



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ PRO VIZUALIZACI NAPĚTÍ
POMOCÍ FOTOELASTICIMETRIE**

DESIGN OF A TEST RIG FOR STRESS VISUALISATION USING PHOTOELASTICIMETRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miroslav Doležel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Michalec

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Miroslav Doležel**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Michalec**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce zařízení pro vizualizaci napětí pomocí fotoelasticimetrie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Fotoelasticimetrie je experimentální metoda pro určení napjatosti v tělese transparentních těles pomocí polariskopu. Na stávajícím zařízení je možné vizualizovat pouze stacionární vzorky. Aby bylo možné vizualizovat napětí pohyblivých vzorků, je nutné navrhnout poháněný mechanismus s dostatečným zatížením pro dosažení viditelné napjatosti.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je konstrukce mechanismu pro vizualizaci dynamického chování transparentního vzorku pomocí fotoelasticimetrie.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- analyzovat a stanovit potřebné zatěžující síly,
- navrhnout koncepční varianty se zatěžováním,
- zpracovat zvolený konstrukční návrh,
- vytvořit výkresovou dokumentaci.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

MILBAUER, Miloš a Miroslav PERLA. Fotoelasticimetrie a příklady jejího použití. Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1961, 504 s.

MILBAUER, Miloš. Fotoelasticimetrie a její použití v praxi. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953, 134 s.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUT IUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá konstrukcí zatěžovacího zařízení pro pozorování pohyblivých vzorků v stávajícím polariskopu. Experimentální metoda fotoelasticimetrie se často používá pro pozorování stacionárních vzorků, avšak pozorování pohybujících se vzorků je méně časté. Přitom časově proměnný vývoj průběhu napětí je pro pochopení napěťových cyklů ve strojních součástech důležitý. Teoretická část obsahuje základní informace týkající se metody fotoelasticimetrie, možnosti jejího použití a její omezení. Krátce jsou rozebrány také dynamicky namáhané strojní součásti, z nichž je jako vhodná součást pro pozorování v polariskopu vybráno ozubené soukolí. Dále je pozornost zaměřena na materiály a možnosti výroby vzorků pro fotoelasticimetrické zkoumání. Z těchto poznatků vychází určení potřebného zatížení vzorku ozubeného kola. Je navrženo konkrétní konstrukční řešení zatěžovacího zařízení, které je schopné ve vzorcích vyvolávat určené napětí. Kritické uzly konstrukce jsou podloženy pevnostními výpočty. Konstrukční řešení nabízí variabilitu upnutí pro různé velikosti vzorků, a je tak využitelné i pro vyšetřování napětí na jiné konfiguraci ozubených kol.

KLÍČOVÁ SLOVA

experimentální zařízení, vnitřní napětí, ozubené soukolí, plastové ozubené kolo

ABSTRACT

The purpose of this work is to construct a specific loading device for the observation of moving samples in the existing polariscope. The experimental method of photoelasticity is often used to observe stationary samples, but the observation of moving samples is less common. However, the time-varying development of the stress profile is very important for understanding of the stress cycles in the machine components. The theoretical part contains a basic information about the method of photoelasticity, its advantages and limitations and the possibility of its use. Then the dynamically stressed machine elements are mentioned, from which the gear is selected as a preferable element for observation in the polariscope. Furthermore, attention is focused on materials and techniques of sample production. The determination of the required load of the gear sample is based on these findings. The most suitable design of the loading device capable of inducing specified stress in the samples is proposed and the critical nodes of the structure are supported by the strength calculations. This design offers variability for clamping different sample sizes and can thus be used to investigate stress in other gear configurations as well.

KEYWORDS

experimental device, internal stress, gears, plastic gear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOLEŽEL, Miroslav. *Konstrukce zařízení pro vizualizaci napětí pomocí fotoelasticimetrie*. Brno, 2021, 60 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Michalec

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Michalu Michalcovi za odborné vedení mé práce, cenné rady a připomínky a kladení otázek, které mi pomohly najít odpovědi.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Michala Michalce. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Fotoelasticimetrie	14
2.1.1	Princip metody	15
2.1.2	Řešení prostorových úloh	18
2.2	Vzorky	19
2.2.1	Materiály vzorků	19
2.2.2	Návrh a výroba vzorků	20
2.3	Dynamicky namáhané pohybující se součásti	21
2.3.1	Valivá ložiska	21
2.3.2	Vačkový mechanismus	22
2.3.3	Ozubené soukolí	23
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	24
3.1	Analýza problému	24
3.1.1	Výběr vhodné součásti pro pozorování	24
3.1.2	Omezení metody	24
3.1.3	Zástavbový prostor	25
3.2	Cíl práce	25
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	26
4.1	Pohonný mechanismus	26
4.1.1	Koncept I.	26
4.1.2	Koncept II.	27
4.1.3	Koncept III.	28
4.2	Brzdící mechanismus	29
4.2.1	Koncept I.	29
4.2.2	Koncept II.	29
4.2.3	Koncept III.	30
4.3	Výběr koncepčního řešení	31
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	32
5.1	Rám	34

5.2	Vzorky	35
5.3	Pohonný mechanismus	40
5.4	Brzdící mechanismus	46
6	DISKUZE	49
7	ZÁVĚR	51
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	52
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	56
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	57
11	SEZNAM TABULEK	59
12	SEZNAM PŘÍLOH	60

1 ÚVOD

Znalost velikosti a průběhu napětí uvnitř strojních součástí je základním předpokladem k bezpečnému provozu dané součásti. K vyšetřování napětí lze přistoupit analyticky, avšak tento způsob umožňuje určení hodnoty napětí pouze na elementárních tělesech. Tvarově obtížnější geometrie jsou většinou analyticky neřešitelné a jen některé z často používaných strojních součástí lze na tomto základě vyšetřovat za použití povětšinou experimentálně zjištěných a úspěšnými aplikacemi ověřených korekčních součinitelů.

Důležitost znalosti průběhu napětí byla podnětem výzkumu v této oblasti, který je stále aktuální, a dala vzniku řadě experimentálních i numerických metod. Z numerických metod dnes nejpoužívanější metoda konečných prvků k řešení problémů využívá naprosto odlišného přístupu oproti metodě analytické a vyšetřované těleso dělí na elementy konečné velikosti. Posuvy těchto elementů jsou poté řešeny soustavami rovnic a hledané napětí je určeno z posuvů pomocí přepočtových vztahů. Tímto způsobem lze získat přibližné řešení, které se při správném nastavení výpočtu bude od skutečnosti lišit jen zanedbatelně. Ověření správnosti výpočtu je však pro většinu aplikací nezbytné a velmi často je realizováno opět některou z experimentálních metod.

Jednou z experimentálních metod, metodou fotoelasticimetrie, se zabývá tato práce. Je to metoda, kterou lze vyšetřovat napětí na průhledných vzorcích konstrukcí. Vizualizace napětí pomocí této metody je zcela unikátní, jelikož je založena na fyzikálních dějích a propojuje se v ní vnitřní napětí s vnitřním uspořádáním látky, což lze pozorovat jako změnu barvy procházejícího světla. Barevné odstíny se na základě těchto zákonitostí přirozeně objevují po ploše vzorků umístěných v polariskopu, a je tak možné z nich určit výsledný průběh napětí. To předurčuje tuto metodu k snadné demonstraci průběhu napěťových stavů na součástech.

Návrh konstrukce zařízení, které je obsahem této práce, by měl umožnit pozorování tohoto jevu a tím usnadnit pochopení průběhu napětí v komplikovanějších strojních součástech. Dále by měl rozšířit možnosti vyšetřování napětí v méně časté aplikaci této metody a to za pohybu vzorků.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Fotoelasticimetrie

Fotoelasticimetrií rozumíme experimentální metodu, kterou lze vyšetřovat směry hlavních napětí a jejich velikosti po celé ploše vzorků [1]. Metoda využívá několik fyzikálních vlastností materiálu vzorků, a to převážně vlastností optických. Jednou z nich je dvojlom známý již od 17. století u většiny krystalických látek [2] [3]. Fyzik Brewster tento jev pozoroval roku 1815 v zatíženém skle, které je v nenapjatém stavu izotropní. Dvojlom se ve skle vyskytuje se zatížením a po odlehčení opět mizí, proto se u látek vykazujících obdobné vlastnosti tento jev nazývá dočasný dvojlom [1]. Příklad vizualizace dočasného dvojlomu je na obrázku 2-1. Roku 1854 byla publikována Wertheimem lineární závislost mezi dočasným dvojlomem a rozdílem hlavních napětí. Těchto poznatků k experimentálnímu vyšetření nosníku zatíženého silami bylo poprvé využito roku 1890 Wilsonem [4]. V letech 1900-1913 Mesnager vypracoval úplnou metodu určení průběhu napětí v modelech skutečných konstrukcí. Po první světové válce roste význam metody a objevují se postupy, díky nimž lze kromě rovinných úloh řešit i prostorové a analyticky obtížně řešitelné úlohy [5].

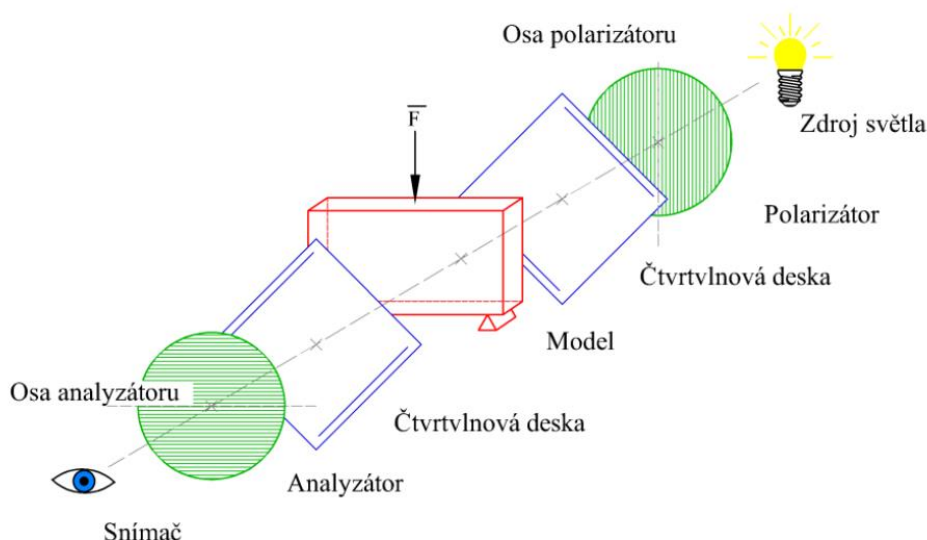


Obr. 2-1 Vizualizovaný dočasný dvojlom pomocí polariskopu (převzato z [6])

Použití fotoelasticimetrie k vyšetřování napětí uvnitř vzorků konstrukcí je v současnosti minimální. V této oblasti byla nahrazena simulačními numerickými metodami založenými převážně na metodě konečných prvků, které umožňují kontrolu konstrukce již ve formě návrhu, bez nutnosti realizace vzorků a zatěžovacích zařízení [5]. Avšak u specifických aplikací vyžadují numerické metody svou validaci, která může být provedena právě pomocí fotoelasticimetrie. Další oblastí, kde se fotoelasticimetrie využívá je určování velikosti zbytkového napětí a defektů během kontroly výrobků z průhledných materiálů, jako jsou například tabule skla, čelní skla automobilů, krycí skla světlometů, skleněné lahve a nádoby [6]. Firma Ilis převážně pro tyto účely vyvinula software, který grafická data získaná pomocí fotoelasticimetrie v reálném čase převádí do digitální podoby a vyhodnocuje velikost napětí v materiálu [7].

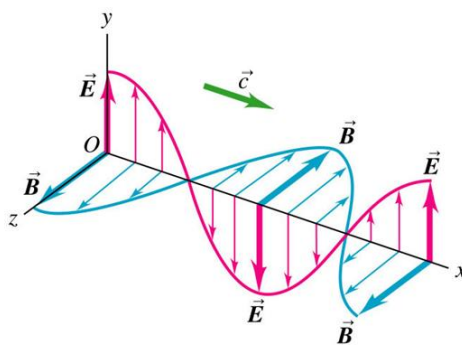
2.1.1 Princip metody

Dočasný dvojlom uvnitř vzorků je vyšetřován polariskopem [1]. Základní polariskop je složen ze zdroje světla, polarizátoru, vyšetřovaného zatíženého vzorku, analyzátoru a snímače. Podle potřeby lze polariskopy doplnit o soustavu čoček, díky nimž je efektivněji využívána plocha polarizátoru a analyzátoru. Pro rozšířené případy měření jsou do sestavy přidány dvě čtvrtvlnové desky, každá z jedné strany vzorku. Schéma polariskopu s čtvrtvlnovými deskami je na obrázku 2-2.



Obr. 2-2 Schéma polariskopu (převzato z [5])

Za zdroj světla lze použít libovolný zářič, který vysílá elektromagnetické záření o vlnové délce, kterou jsou polarizační filtry schopné polarizovat a snímač schopný přijmout. V této práci se omezíme na oblast o vlnové délce viditelného spektra (přibližně 400–750 nm), která je pro měření v praxi nejpoužívanější [1]. Elektromagnetické záření je příčné vlnění tvořené elektrickou složkou \vec{E} a magnetickou složkou \vec{B} , které jsou kolmé vzájemně a zároveň na směr šíření \vec{c} , jak je vidět na obrázku 2-3. Nejčastěji se používá bílé světlo, které obsahuje všechny vlnové délky.

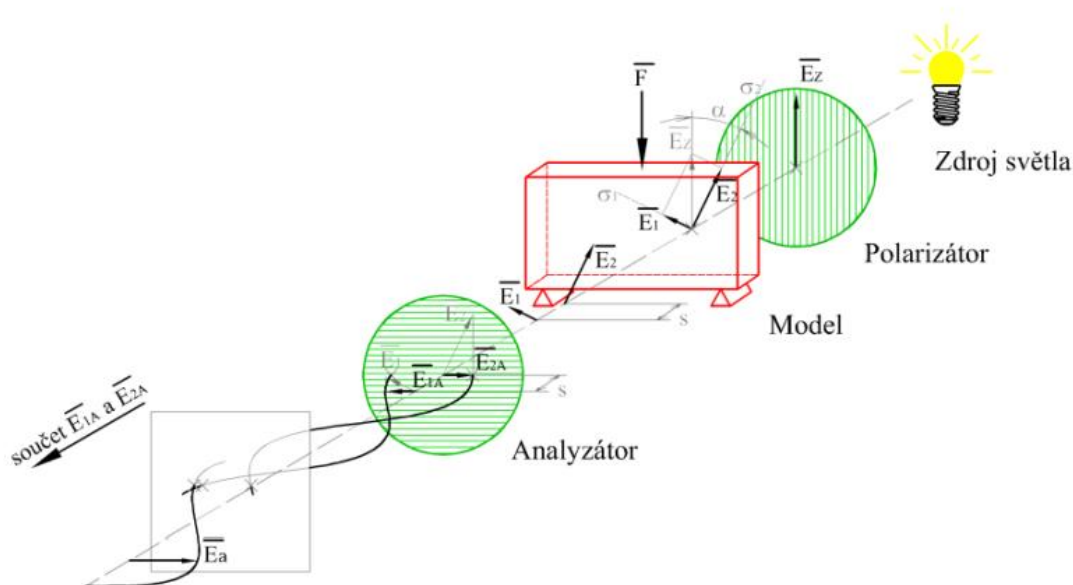


Obr. 2-3 Elektromagnetická vlna (převzato z [8])

Světlo přicházející od zdroje je přirozeně nepolarizované, takže směr vektoru elektrické intenzity v rovině kolmé na směr šíření je nahodilý. Polarizátor je polarizační filtr s osou polarizace. Nepolarizované světlo se po průchodu polarizačním filtrem stává přímkově polarizovaným, což znamená, že směr vektoru elektrické intenzity \vec{E}_z je shodný s osou polarizátoru, jak je vidět na obrázku 2-4.

Na zatíženém vzorku dochází k dvojlomu. Vysvětlení podstaty dočasného dvojlomu je velice obtížné a pro jeho popis existuje více teorií, avšak žádná z nich nepokrývá celou skutečnost [9]. Přesný matematický popis dočasného dvojlomu je tudíž nemožný a lze se opírat pouze o numerické modely [10]. Pro základní představu lze uvést teorii vzniku anizotropního prostředí nebo teorie změny hustoty hmoty, případně změny indexu lomu [9].

Pro využití fotoelasticimetrie v praxi však podstata dějů uvnitř vzorku není nezbytná a lze vystačit s popisem základních jevů. Polarizované světlo se na zatíženém vzorku rozkládá na dva paprsky [1]. Směr šíření světla zůstává nezměněný, ale vektor intenzity elektrického pole se rozkládá do dvou vzájemně kolmých směrů \vec{E}_1 a \vec{E}_2 . Tyto směry jsou zároveň i směry hlavních napětí σ_1 a σ_2 . Každý z paprsků se šíří jinou rychlost, což způsobuje vzájemný fázový posuv s na výstupu paprsků ze vzorku.

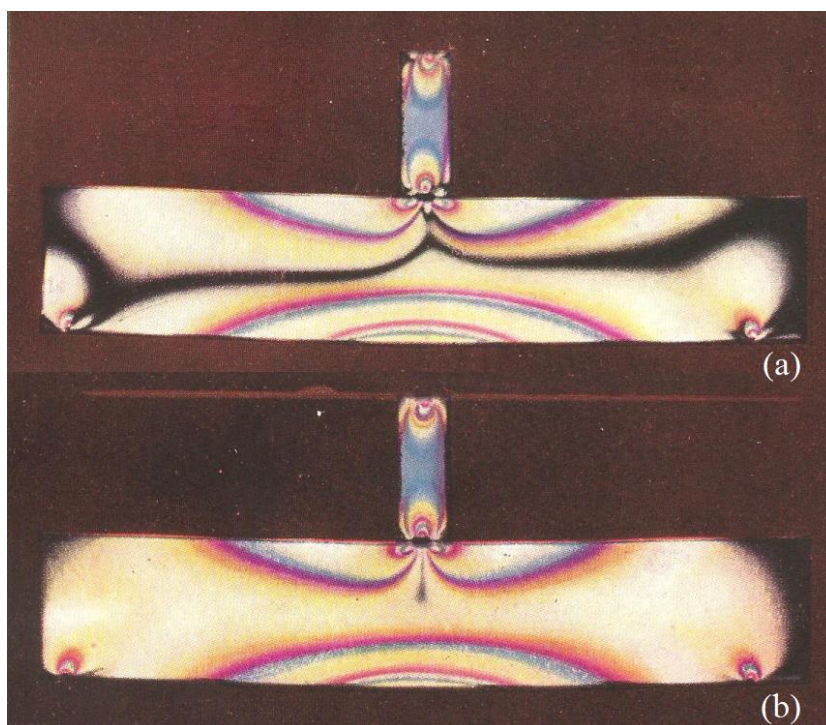


Obr. 2-4 Schéma průchodu elektromagnetického záření polariskopem se vzorkem (převzato z [5])

Analyzátor je polarizační filtr, který přímkově polarizuje světlo přicházející od vzorku. Pro základní měření je osa polarizace analyzátoru vždy kolmá k ose polarizace polarizátoru. Analyzátor propustí pouze tu část elektrické intenzity, která má shodný směr s osou polarizace. Na obrázku 2-4. analyzátozem prochází z paprsků s intenzitou \vec{E}_1 a \vec{E}_2 pouze paprsky s intenzitou \vec{E}_{1A} a \vec{E}_{2A} , po jejichž vektorovém sečtení s uvažováním fázového posuvu dostáváme paprsek o elektrické intenzitě \vec{E}_a , který je zaznamenán snímačem. Snímačem může být jak oko pozorovatele, tak fotoaparát nebo kamera.

Při měření v přímkově polarizovaném světle, tak jak bylo popsáno výše, lze na zatíženém vzorku pozorovat světlá a tmavá místa [1]. Spojnice tmavých míst tvoří izoklinné křivky. Příklad vzniku izoklinné křivky je patrný na obr. 2-5 (a). Tyto křivky jsou definovány jakožto místa, v nichž je jeden ze směrů hlavního napětí rovnoběžný na osu polarizátoru (osa polarizátoru svírá s osou analyzátoru pravý úhel, tudíž směr druhého hlavního napětí je právě rovnoběžný s osou analyzátoru). Mimo izoklinné křivky může k ztmavení na vzorku dojít ještě v místech, kde je rozdíl hlavních napětí roven nule. Taková místa se nazývají body singularity.

Měření probíhá v několika krocích s postupným pootáčením vzorku vůči ose polarizátoru (osy polarizátoru a analyzátoru zachovávají pravý úhel). Při každém z natočení v intervalu nula až devadesát stupňů lze pozorovat jinou izoklinnou křivku, při větším natočení se křivky začnou opakovat. Místa bodů singularity zůstávají při otáčení nezměněná. Matematické vyjádření popsanych jevů je uvedeno v [1] a [5].



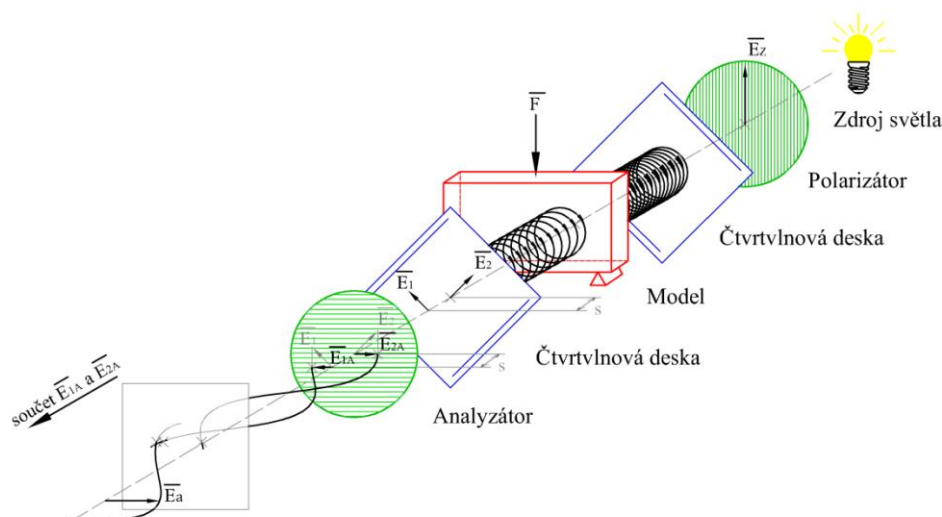
Obr. 2-5 Pozorování vzorku v (a) přímkově polarizovaném světle, (b) kruhově polarizovaném světle (převzato z [1])

Pokud je polariskop doplněn o dvě čtvrtvlnové desky, jak je zobrazeno na obrázku 2-2. a obrázku 2-5., jedná se o měření v kruhově polarizovaném světle [1]. Kruhová polarizace vzniká dvojlomem přímkově polarizovaného světla na čtvrtvlnové desce natočené k ose polarizátoru o 45° , kdy dojde k rozkladu na dva paprsky o stejné intenzitě a na výstupu z čtvrtvlnové desky k fázovému posuvu paprsků právě o $\frac{1}{4}$ vlnové délky. To po sečtení vektorů intenzit způsobí rotaci vektoru intenzity. Z kruhově polarizovaného světla dojde k převodu na přímkově polarizované na druhé čtvrtvlnové desce, která je k první desce natočena o 90° .

Při měření v kruhově polarizovaném světle se neprojevují izoklinné křivky a je tak možné na vzorku pozorovat nenarušené izochromatické křivky [1]. Tyto křivky vzniknou spojením míst se stejným barevným odstínem. Každá takto vzniklá křivka představuje místa s konstantním rozdílem hlavních napětí. Při pozorování v bílém světle se na zatíženém vzorku vykresluje soustava barevných pruhů světelného spektra a toto spektrum se podle velikosti zatížení může i pravidelně opakovat, jak je vidět na obr. 2-1 a 2-5 (b). Isochromatická křivka se vykresluje v místě přechodu mezi spektry, tedy mezi fialovou a červenou barvou [11]. Každé izochromatické křivce se přiděluje její řád a to tak, že první ze vzniklých izochromat (tedy izochromata s nejnižším rozdílem hlavních napětí) má řád 1, další vzniklá řád 2, atd. Z popsanych dějů lze odvodit hlavní rovnici fotoelasticimetrie [5].

$$\delta = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot t}{k} \quad (1)$$

Kde: σ_1, σ_2 první a druhé hlavní napětí
 k optická citlivost
 t tloušťka vzorku
 δ řád izochromatické čáry



Obr. 2-6 Schéma měření v kruhově polarizovaném světle (převzato z [5])

2.1.2 Řešení prostorových úloh

Pro řešení prostorových úloh je nutné využít některou z metod, která trojrozměrnou úlohu převede na rovinou [5]. Milbauer a Perla ve svojí práci [9] popisuje metodu slepovaných vzorků, zmrazování prostorových vzorků a metodu rozptýleného světla. První jmenovaná metoda umožňuje pozorování pouze osově symetrických těles. U poslední jmenované je nutné vzorek ponořit do kapaliny o stejném indexu lomu a prosvětlit jej svazkem světla protínajícím vzorek ve vyšetřovaném řezu.

Metoda zmrazení je nejpoužívanější pro řešení prostorových úloh a využívá vlastností materiálu vzorku, jež vhodnou změnou teploty během zatížení dokáže zachovat svoje vnitřní uspořádání, a tedy i vlastnost dvojlomu, a to i po odstranění zatížení [9]. Takto připravený vzorek je nařezán na pláty v požadovaných řezech a tyto řezy jsou následně vyšetřovány stejným způsobem jako vzorky rovinné v polariskopu.

2.2 Vzorky

2.2.1 Materiály vzorků

Na materiál vzorku jsou kladeny nároky zvláště na mechanické a optické vlastnosti [9]. Vyžadujeme homogennost, stejný lineární vztah mezi napětím a prodloužením jak v tahové, tak v tlakové oblasti, a to až do meze úměrnosti, která by měla být dostatečně vysoká. Pokud Poissonovo číslo materiálu vzorku se svou hodnotou blíží hodnotě reálného materiálu konstrukce, pak je i stav napjatosti ve vzorku bližší stavu napjatosti v konstrukci [1]. Dále vyžadujeme snadnou opracovatelnost a nepřítomnost zbytkového napětí.

Z optických vlastností je nejzásadnější dočasný dvojlom a jeho lineární vztah s napětím a optická citlivost materiálu na velikost napětí, což znamená nízkou hodnotu jejího číselného vyjádření [1]. Dále musí být materiál dostatečně transparentní a to i při větších tloušťkách. K vybraným materiálům jsou v tabulce 2-1 uvedeny moduly pružnosti E , Poissonova čísla μ , doporučená maximální napětí σ_D , optické citlivosti k a způsob výroby vzorku.

Tab. 1 Vlastnosti vybraných skupin materiálů

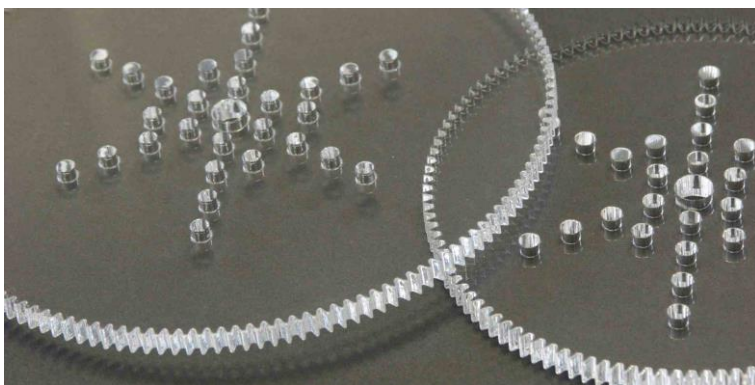
Materiál	E GPa	μ -	σ_D MPa	k N/mm	Způsob výroby vzorku
Sklo [1; 9]	63 – 70	0,25	20 – 30	200 – 250	obrábění, vyřezávání
Celuloid [1; 9]	2,0 – 2,5	0,33	10 – 15	37 – 52	obrábění, vyřezávání
Plexi-sklo [1; 9; 12]	2,1 – 2,8	0,38	20	120 – 150	obrábění, vyřezávání
Epoxidové pryskyřice [9; 12]	3,3 – 3,4	0,37	50 – 55	11	odlévání, stereolitografie
Polyester [12]	3,9	0,35	48	24	obrábění, vyřezávání
Polykarbonát [12; 13]	2,3	0,28	63	7	obrábění, vyřezávání

2.2.2 Návrh a výroba vzorků

Při experimentech se nejčastěji setkáme se vzorky zmenšenými oproti skutečným konstrukcím [9]. Rozměrová změna vzorku se musí promítnout také ve změně velikosti jeho zatížení a vyhovět tak fyzikální podobnosti [1]. Výroba rovinných vzorků může být prováděna různě podle materiálu a tvarové obtížnosti.

Při výrobě vzorku z desky materiálu je nejprve vyříznut pilkou polotovár, který je následně obráběn na frézce, případně pilníky ručně [1]. Ve všech fázích výroby je dbáno velké opatrnosti, jelikož materiály jsou křehké a trpí na vznik lasturovitého lomu, a také aby nedošlo k poškrábání povrchu. Zbytkovému napětí v okolí obráběných hran nelze úplně zamezit, ale je snaha ho minimalizovat použitím ostrých nástrojů s vhodným nastavením řezných úhlů a řezných rychlostí, malého úběru materiálu a dobrého chlazení.

Pomocí laseru nebo vodního paprsku je možné vyřezávat tvarově obtížné vzorky [14]. U obou metod je nezbytné správné nastavení řezných podmínek pro minimalizaci zbytkového napětí v okolí řezu, přičemž při řezání vodním paprskem je vznik zbytkového napětí minimální [15]. Při řezání laserem je u některých materiálů nedostatečná kvalita řezu, případně hrozí i jejich vznícení, tudíž rozsah použití této metody pro výrobu fotoelasticimetrických vzorků je značně omezen. Příklad vzorku vyříznutého laserem je na obrázku 2-7.



Obr. 2-7 Vzorek z plexiskla vyříznutý laserem (převzato z [16])

Vzorky z materiálů na to určených lze také vyrábět odléváním do forem [9]. Tento způsob výroby umožňuje výrobu i komplikovaných geometrií se vznikem menšího zbytkového napětí podél hran vzorku. Nevýhodami odlévání jsou objemové kontrakce při tuhnutí (polymerizaci), nutnost pečlivé přípravy formy s hladkými povrchy a nutnost přenechání výroby chemické laboratoři, která se stará o přípravu materiálu i výrobní postup.

S rozšířením technologií 3D tisku se tento způsob výroby začal uplatňovat i při výrobě vzorků pro fotoelasticimetrii [17]. Vzorky je možné vyrábět metodou stereolitografie (SLA), tedy postupným vytvrzováním vrstev fotopolymeru pomocí laseru. Příklad takto vyrobených vzorků je na obrázku 2-8. Tento způsob výroby má nesporné výhody ve výrobě i obtížných tvarů ve velmi krátkém čase. Na tisk kvalitních vzorků bez zbytkového napětí a s dostatečnou průhledností jsou kladeny vysoké nároky, které nedokáže splnit každá z dostupných SLA tiskáren [18]. Další komplikací je kompatibilita vhodného materiálu s konkrétní SLA tiskárnou [19].



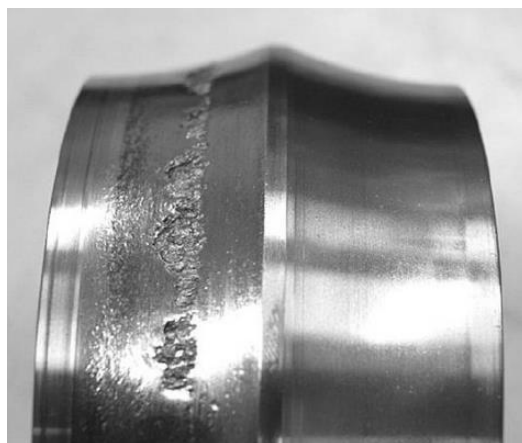
Obr. 2-8 Vzorky vyrobené stereolitograficky z epoxidové pryskyřice (převzato z [20])

2.3 Dynamicky namáhané pohybující se součásti

Tato kapitola se zaměřuje na vybrané mechanismy a pohyblivé strojní součásti, které jsou namáhány dynamicky a mají potenciál pro měření pomocí fotoelasticimetrie. Každá podkapitola tedy obsahuje popis dané součásti či mechanismu, jeho nejčastější poruchy a možnosti testování. Dále jsou uvedeny odkazy na provedený výzkum zkoumání konkrétní součásti pomocí metody fotoelasticimetrie.

2.3.1 Valivá ložiska

Valivá ložiska jsou strojní součásti zásadně snižující třecí odpor mezi dvěma pohybujícími se plochami [21]. Nejčastější poruchou valivých ložisek je únavové poškození kontaktních ploch a s ním související tzv. pitting, jehož příklad je zobrazen na obrázku 2-9. Avšak vznik pittingu není závislý pouze na velikosti kontaktního napětí, dalšími důležitými faktory jsou způsob mazání a mazivo, materiál a jeho zpracování a znečištění ložiska [22]. Ložiska jsou testována nejčastěji výrobci na zkušebních zařízeních, pro určení jejich trvanlivosti. Přesný průběh zkoušky je shrnut v [23].



Obr. 2-9 Pitting na vnitřním kroužku valivého ložiska (převzato z [21])

V článku [24] byl testován vzorek kuželíkového ložiska pomocí metody fotoelasticimetrie. Vzorek ložiska byl vytvořen pomocí stereolitografie z epoxidové pryskyřice. Jelikož se jedná a prostorovou úlohu bylo napětí vyšetřováno pomocí metody zmrazení napětí. Bylo ověřeno, že napětí zjištěné metodou fotoelasticimetrie jsou v dobré shodě s numerickým výpočtem pomocí metody konečných prvků.

2.3.2 Vačkový mechanismus

Nejčastější použití vačkového mechanismu je pro přenos rotačního pohybu vačky na posuvný pohyb zdvihátka [25], přičemž průběh pohybu zdvihátka při konstantním otáčení vačky ovlivňuje tvar vačky. Kontakt vačky a zdvihátka může být realizovaný buď vzájemným smýkáním povrchů, nebo pomocí kladky [26]. Styk pomocí kladky výrazně snižuje tření mezi povrchy. Podle způsobu realizace kontaktu, mazání, znečištění a dalších faktorů může docházet k rozdílným poruchám. Mezi nejčastější patří adhezní opotřebení, abrazivní opotřebení, koroze a kontaktní únava [27].

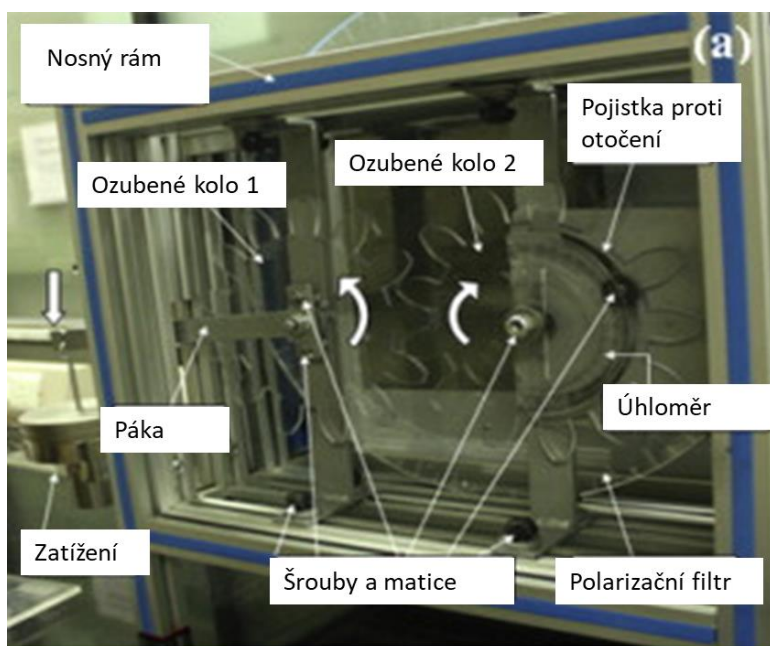
Pozorování vzorku vačky pomocí fotoelasticimetrie není příliš perspektivní. Adhezní ani abrazivní opotřebení ani koroze nejsou pozorovatelné jevy pomocí této metody. Napětí zodpovědné za vznik kontaktní únavy vyvolané tlakem v kontaktu pozorovatelná je, avšak kontakt vačky se zdvihátkem, případně vačky s kladkou lze aproximovat problémem styku dvou válců, jež lze analyticky řešit pomocí Hertzova tlaku [28].

2.3.3 Ozubené soukolí

Ozubené soukolí slouží k přenosu mechanické energie a pohybu [29]. Časté poruchy ozubených soukolí lze z podstaty jejich konstrukce rozdělit na poruchy způsobené kontaktním tlakem a na poruchy způsobené ohybovým napětím v zubech [30]. Poruchy způsobené kontaktním tlakem jsou shodné s poruchami u ložisek a vaček uvedenými v předchozích kapitolách. Ohybové napětí bývá nejkritičtější v průřezu paty zubu a může vést k únavovému lomu, případně k lomu při přetížení [31].

V současné době narůstá počet aplikací ozubených kol vyrobených z plastů [31]. Ozubená kola z těchto materiálů lze snadno vyrábět s nenormalizovaným profilem zubů, což může být u specifických aplikací výhodné.

Ozubené soukolí s trhlinou bylo pomocí fotoelasticimetrie jakožto stacionární vzorek úspěšně testováno v práci [32]. Vzorky byly vyrobeny obráběním na frézce z polykarbonátu. Výsledky experimentu byly porovnávány s analyticky určenými hodnotami s dobrou shodou. Vzorky upnuté v testovacím zařízení jsou na obrázku 2-10. V práci [20] je vyšetřována metodou fotoelasticimetrie část ozubeného kola. Vzorky jsou vidět na obrázku 2-8 a byly vyrobeny pomocí stereolitografie z epoxidové pryskyřice. Vyšetřování napětí bylo prováděno metodou zmrazení napětí a následně porovnáváno s výsledky získanými pomocí metody konečných prvků. Závěr práce opět ukazuje shodu experimentu s numerickým výpočtem.



Obr. 2-10 Testovací zařízení stacionárního ozubeného soukolí (převzato z [32])

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

3.1.1 Výběr vhodné součásti pro pozorování

Součást, která bude vyšetřována pomocí fotoelasticimetrie byla vybrána na základě poznatků shrnutých v kapitole Současný stav poznání. S využitím moderních technik výroby vzorků je možné vyrobit i tvarově velmi složitou součást. Fotoelasticimetrie umožňuje za použití speciálních postupů vyšetřovat napětí i u prostorových problémů, avšak pro tato měření je nutné použít některou z metod z kapitoly 2.1.2., které jsou pro pohyblivé dynamické experimenty realizovatelné jen obtížně. Vzorky všech součástí uvedených v kapitole 2.3 by mohly být realizovatelné a i pozorovatelné jakožto plošná úloha.

Vizualizovaný průběh napětí u pohyblivého vzorku ložiska je poměrně předvídatelný jev. Průběh napětí lze lépe určit na stacionárním vzorku. Zásadní vliv mazání a vliv materiálu a jeho úpravy by do experimentu pomocí fotoelasticimetrie nebylo možné zahrnout. Pohyblivý vzorek vačky se zdvihátkem by mohl působit problém v místě styku, jelikož materiály vzorků jsou značně křehké a náchylné na poškrábání. Použití vzorku vačky a zdvihátka s kladkou by znamenalo obtížnou realizaci uložení kladky. Pozorovatelné napětí v kontaktu by již mělo proměnný časový průběh. Opět by nebylo možné zahrnout jeden ze zásadních faktorů, a to vliv mazání.

Ozubená kola se jeví jakožto nejzajímavější pro pozorování pomocí fotoelasticimetrie. Na vzorcích by vznikalo jednak napětí v kontaktu a dále ohybové napětí v patě zubu. Časový průběh těchto napětí na pohyblivém vzorku by byl velice dynamický. Dalším důvodem pro vyšetřování ozubeného soukolí pomocí fotoelasticimetrie je nárůst aplikací plastových ozubených kol s nenormalizovaným profilem. Pevnostní kontrola těchto soukolí je prováděna nejčastěji numericky a vyvstává problém validace těchto výpočtů. Zařízení schopné experimentálně ověřit numerické výpočty je v tomto případě velmi vhodným řešením.

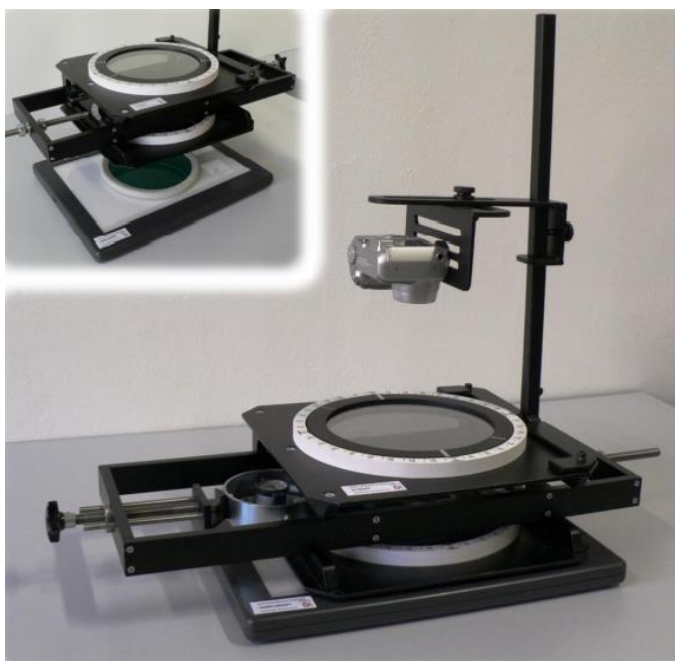
3.1.2 Omezení metody

Jak plyne z kapitoly 2.1.1., vzorek, který se během měření otáčí vůči ose polarizátoru je pro dosažení směrodatných výsledků možné pozorovat pouze v kruhově polarizovaném světle, tedy pozorovat izochromatické křivky. Při pozorování v přímkově polarizovaném světle by vznikaly izoklinné křivky, avšak vyhodnocení takto naměřených dat by bylo velmi obtížné, jelikož pro každé natočení vzorku vůči ose analyzátoru vzniká jiná izoklinná křivka.

3.1.3 Zástavbový prostor

Mechanismus pro vizualizaci dynamického chování vzorku bude umístěn do stávajícího polariskopu v laboratořích Ústavu konstruování. Jedná se o polariskop FL 210 od firmy G.U.N.T. Gerätebau GmbH doplněný o stativ a fotoaparát Nikon Coolpix 4300 sloužící jako snímač (obrázek 3-1). Zástavbový prostor pro umístění mechanismu se vzorky je značně omezen rozměry konstrukce polariskopu, takže bude nutné při konstrukci mechanismu přistupovat k prostorově úsporným řešením.

Ke konstrukci je také přistupováno se snahou maximalizovat průhledovou plochu vzorků. Zcela zásadní je tento požadavek v oblasti kontaktu obou vzorků, kde je očekáván výrazný průběh napětí.



Obr. 3-1 Polariskop v laboratořích Ústavu konstruování

3.2 Cíl práce

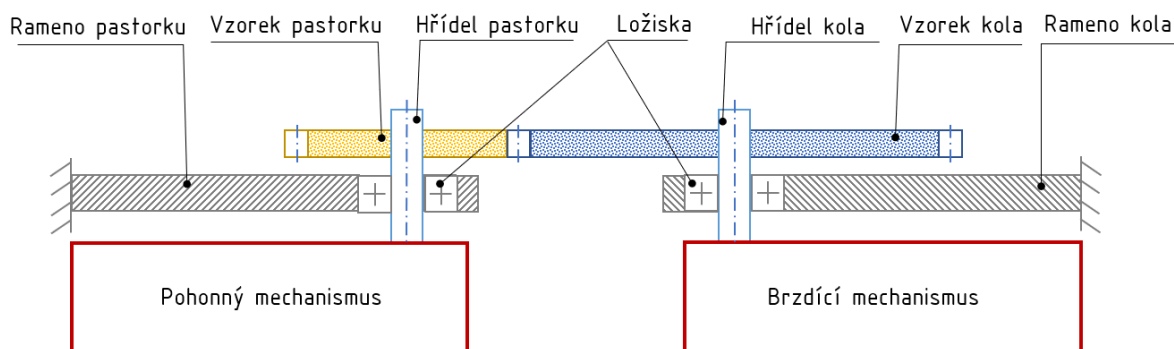
Cílem této práce je konstrukce zatěžovacího mechanismu pro vizualizaci dynamického chování transparentního vzorku pomocí experimentální metody fotoelasticimetrie.

Dílčí cíle jsou:

- analyzovat a stanovit potřebné zatěžující síly,
- navrhnout koncepční varianty se zatěžováním,
- zpracovat zvolený konstrukční návrh,
- vytvořit výkresovou dokumentaci.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Jelikož interakce pohonu a brždění vzorku je realizována přes mezičlen, tedy vzorky, bylo přistoupeno k řešení, kdy koncepty těchto dvou konstrukčních uzlů jsou vytvářeny nezávisle (obrázek 4-1). Řešenou oblastí je tedy v kapitole 4.1 pohonný mechanismus a přenos točivého momentu z pohonného mechanismu na hřídel pastorku vzorku a v kapitole 4.2 přenos točivého momentu z hřídele kola vzorku na brzdící člen, kde je dodávaná energie mařena.

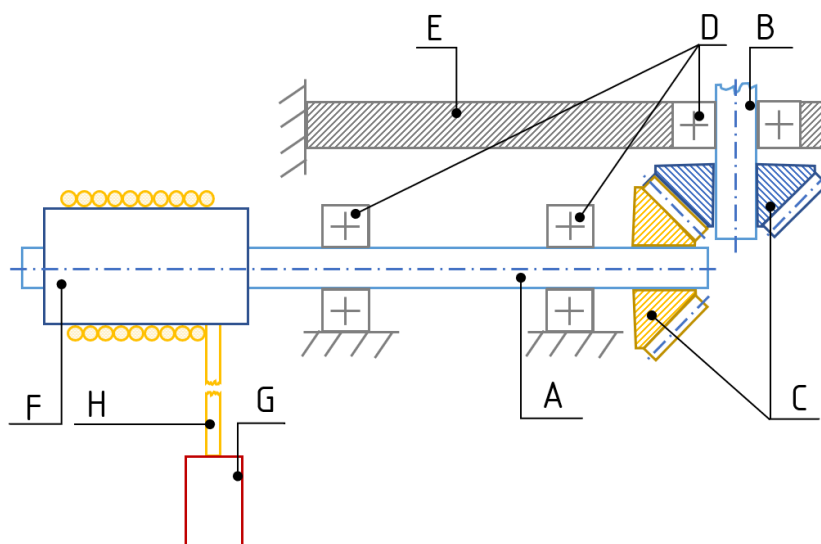


Obr. 4-1 Schéma rozdělení konstrukčních uzlů

4.1 Pohonný mechanismus

4.1.1 Koncept I.

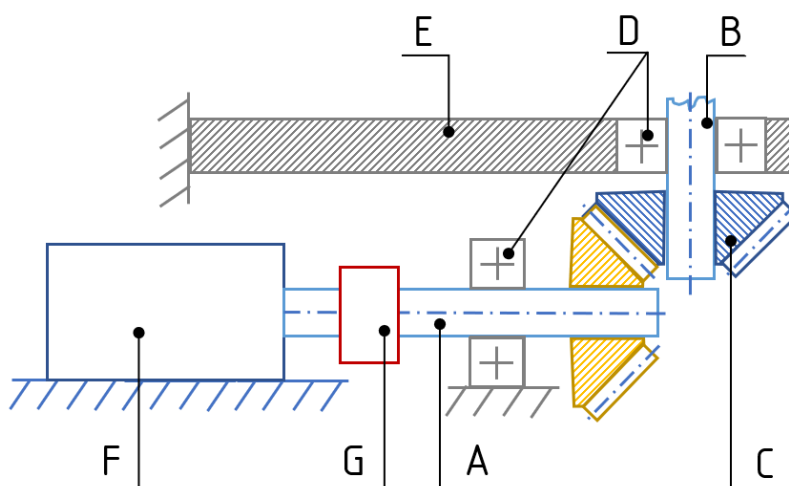
Točivý moment je v tomto řešení dodáván podle samotné definice momentu, tedy silou na rameni. Sílu tvoří závaží (G) v tíhovém poli a ramenem je poloměr lanového bubnu (F). Závaží je k bubnu připevněno pomocí lana (H), které je obtočeno kolem lanového bubnu. Z lanového bubnu je točivý moment přenášen přes hnací hřídel (A) a kuželové soukolí (C) až na hřídel pastorku (B). Hřídele jsou uloženy v ložiscích (D) k rámu a ramenu pastorku (E) (obrázek 4-2). Výhodou tohoto řešení je variabilita dodávaného točivého momentu podle hmotnosti závaží, možnost dodávání momentu i plně zabrzděným vzorkům, tedy lze pozorovat nejen pohyblivé vzorky, ale i vzorky stacionární. Další výhodou je nízká cena pohonné soustavy - závaží, lanového bubnu a lana. Nevýhodami jsou přerušované měření a omezený čas každého měření, jelikož délka lana je omezena polohou zařízení vůči podlaze. Obtížná příprava každého měření spočívající v namotání lana zpět na buben se taktéž řadí mezi nevýhody.



Obr. 4-2 Schéma pohonného mechanismu I.

4.1.2 Koncept II.

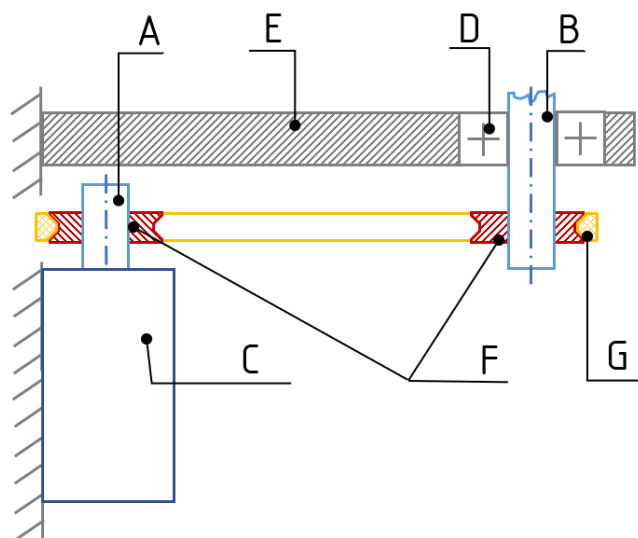
Točivý moment je v tomto případě generován elektromotorem (F) připojeným k hnací hřídeli (A) pomocí spojky (G). Dále, na hřídel pastorku (B), je přenášén kuželovým soukolím (C), stejně jako v předchozím případě. Hřídele jsou uloženy v ložiscích (D) k rámu a ramenu (E) (obrázek 4-3). Výhodou tohoto řešení je libovolně dlouhý chod měření, díky elektromotoru. Nevýhodou je cenově i prostorově náročné kuželové soukolí a nutnost hnací hřídele a spojky.



Obr. 4-3 Schéma pohonného mechanismu II.

4.1.3 Koncept III.

Zdroj točivého momentu je stejný jako v předešlém případě, tedy elektromotor (C). Výstupní hřídel elektromotoru (A) je tentokrát umístěna vertikálně a je na ní umístěna řemenice (F). Elektromotor je uložený k rámu a hřídel pastorku stejně jako v předešlých případech v ložiscích (D) v ramenu (E). Pomocí řemenu (G) je točivý moment přenášen na řemenici a hřídel pastorku (B) (obrázek 4-4). Díky tomuto řešení nepůsobí na ložiska hřídele pastorku axiální síla od pohonné soustavy, avšak radiální zatížení oproti řešení s kuželovým soukolím výrazně naroste kvůli předpětí řemenic. Výhodou tohoto řešení je, že přenos pomocí řemenice je cenově výhodnější a prostorově úspornější oproti kuželovému ozubenému soukolí.

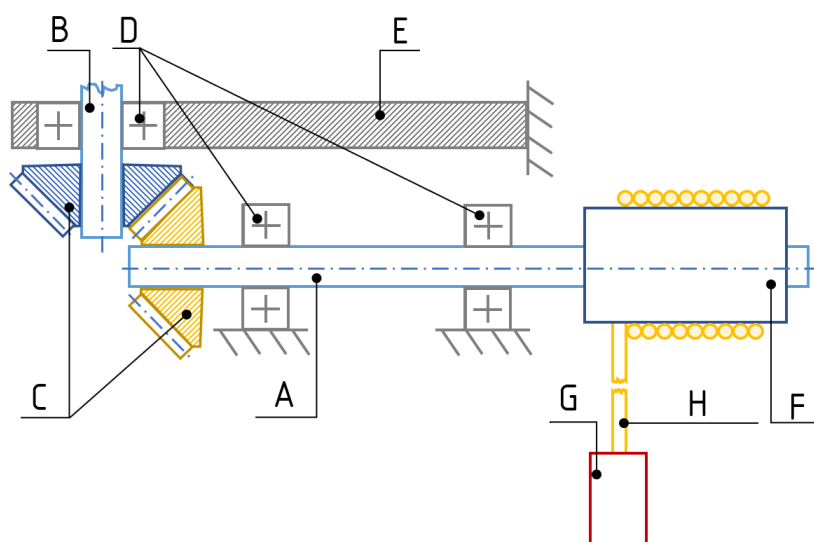


Obr. 4-4 Schéma pohonného mechanismu III.

4.2 Brzdící mechanismus

4.2.1 Koncept I.

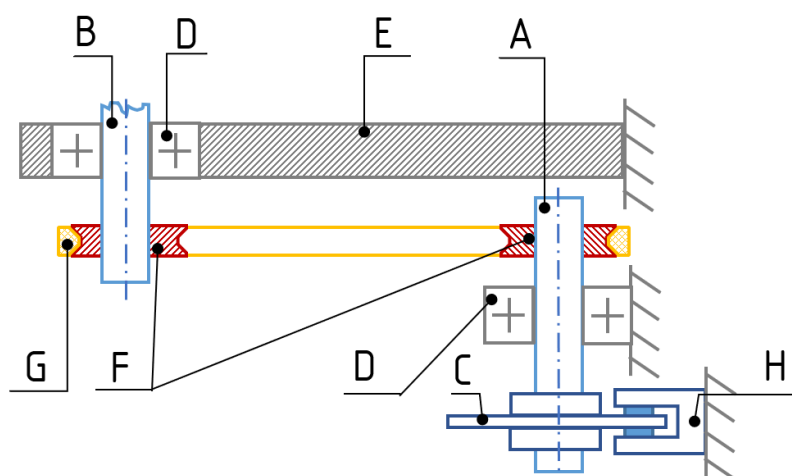
Brzdění je u tohoto řešení realizováno stejnou konstrukcí jakožto pohon v pohonném mechanismu I., avšak funkce je reverzní. Tedy závaží (G) připojené lanem (H) k lanovému bubnu (F) je navíjeno díky působení točivého momentu přenášeného z pohonného mechanismu přes vzorky na hřídel kola (B) a následně pomocí kuželového soukolí (C) na brzdící hřídel (A). Hřídele jsou opět uloženy v ložiscích (D) k rámu a rameni kola (E) (obrázek 4-5). Výhodou je velmi přesné dodávání brzdného momentu a jeho variabilita snadno ovlivnitelná hmotností závaží. Nevýhody se shodují s nevýhodami vyjmenovanými v kapitole 4.1.1 u pohonného mechanismu I., pouze s rozdílem, že lano nebude nutné na buben namotávat, nýbrž bude nutné provádět operaci opačnou.



Obr. 4-5 Schéma brzdícího mechanismu I.

4.2.2 Koncept II.

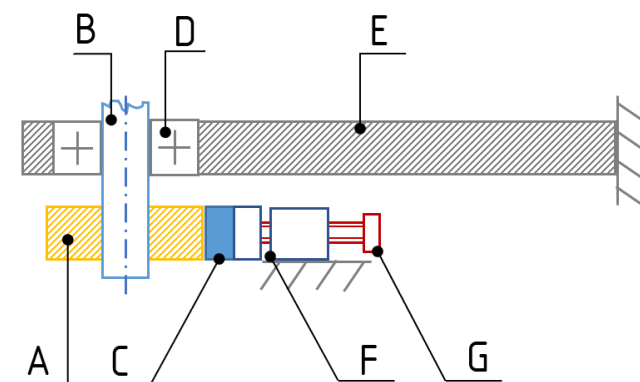
Přenos točivého momentu z hřídele kola (B) na brzdící hřídel (A) je pomocí řemenic (F) s řemenem (G). Na brzdící hřídeli je osazen brzdový kotouč (C), který pomocí třmenu s brzdovými destičkami (H) maří dodávanou mechanickou energii na teplo. Hřídele jsou opět uloženy v ložiscích (D) a uloženy k rámu a rameni kola (E) (obrázek 4-6). Mezi výhody tohoto řešení patří nízká cena a malé rozměry řemenic. Nevýhodou je obtížně stanovitelná hodnota brzdného momentu.



Obr. 4-6 Schéma brzdícího mechanismu II.

4.2.3 Koncept III.

Prostorově nejúspornější variantou je umístění brzdného kotouče (A) přímo na hřídel kola (B). Kotouč je v tomto případě brzděn brzdovou destičkou (C) přitlačovanou radiálně ke kotouči pomocí šroubu (G) uloženého v pouzdře (F). Hřídel kola je uložen v ložiscích (D) a rameni kola (E) k rámu (obrázek 4-7). Výhodou je, že brzdný moment nemusí být přenášen přes soustavu mezičlenů a je vytvářen přímo na hřídeli kola. Mezi nevýhody lze zařadit vysoké ohybové zatížení hřídele vlivem přitlačované brzdné destičky a možné znečištění polarizačního filtru (umístěn pod brzdným kotoučem) pevnými částicemi vzniklými otěrem kotouče a destičky. Hodnota brzdného momentu je stejně jako v předchozím případě stanovitelná jen obtížně.

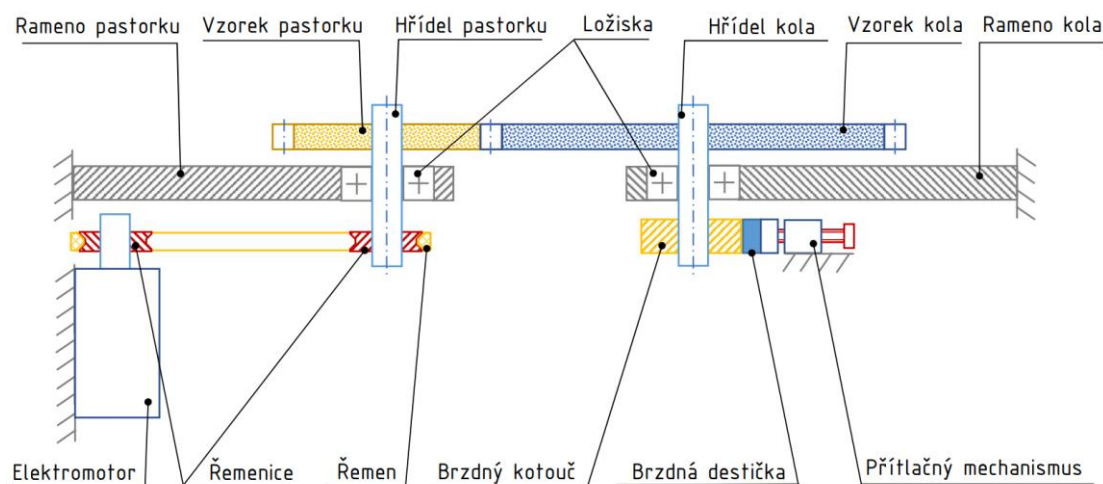


Obr. 4-7 Schéma brzdícího mechanismu III.

4.3 Výběr koncepčního řešení

Nejlepší řešení z navržených konceptů je zobrazeno na obrázku 4-8. Jedná se o kombinaci pohonu pomocí elektromotoru a přenosu točivého momentu na hřídel pastorku řemenem a brzděného kotouče umístěného přímo na hřídeli kola. Toto řešení umožňuje časově neomezené a nepřerušované pozorování pohybujících se vzorků, což je uživatelsky nejvhodnější. Určení velikosti momentu na vzorcích je v tomto řešení v základním provedení obtížné, avšak tento parametr není po konstrukci vyžadován a v případě potřeby lze snadno měřicí člen doplnit. Řemen a řemenice jsou pro zástavbové možnosti nejvhodnější pro svou prostorovou úspornost a jejich nižší cena oproti kuželovým soukolím je jen další výhodou.

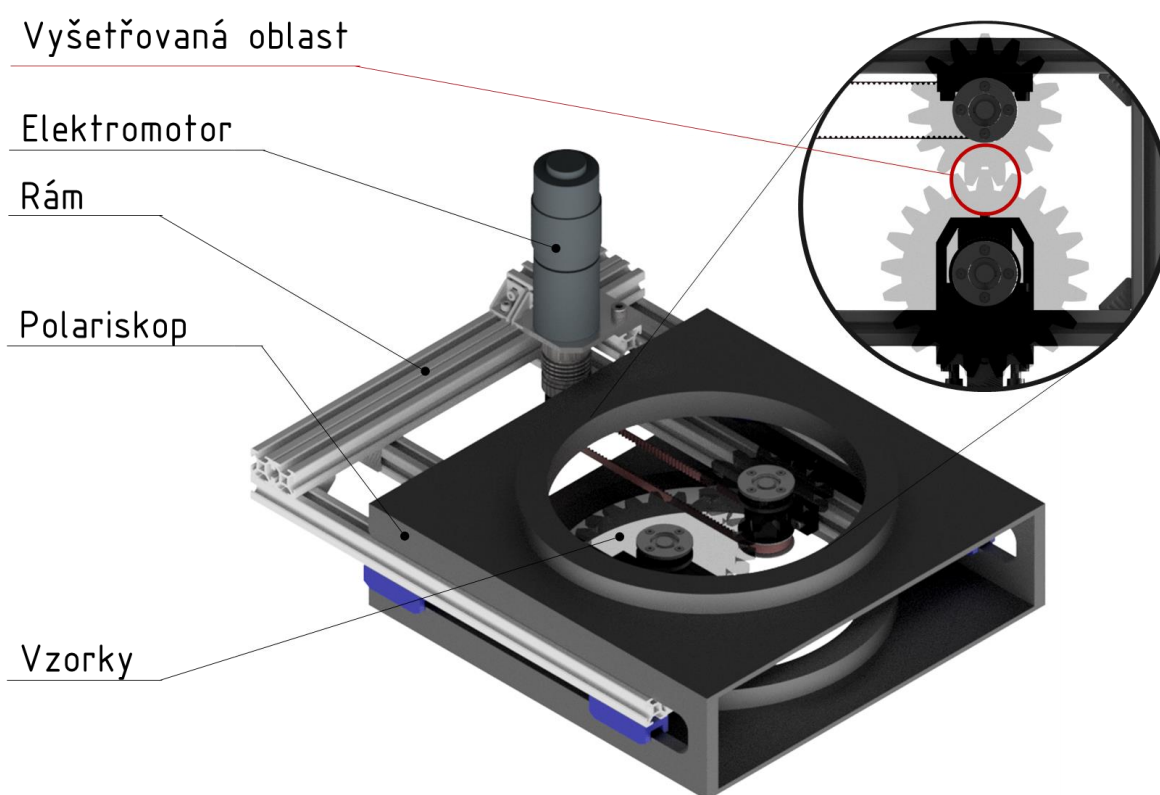
Brzdění vzorků přímo na hřídeli kola přináší velkou finanční i prostorovou úsporu na mezičlenech přenášejících točivý moment. Jelikož otáčky vzorků nebudou nijak velké a doba provozu v řádech minut, lze očekávat jen malé opotřebení brzdné soustavy a vznik zanedbatelného množství pevných částic při brzdění, takže polarizační filtr nebude znečištěn. V případě dlouhodobějšího provozu lze pod brzdu umístit externí součást, která by částice zachytávala.



Obr. 4-8 Schéma vybraného koncepčního řešení

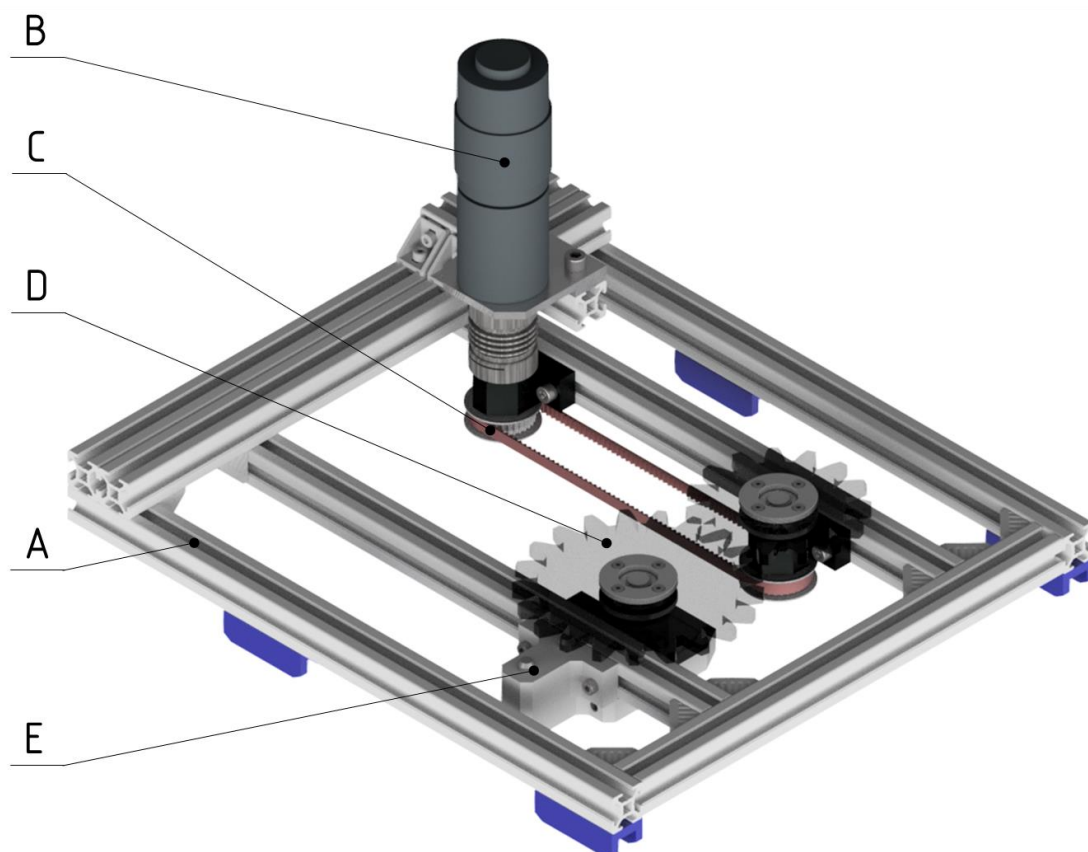
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Konstrukci zařízení pro vizualizaci napětí na ozubeném soukolí pomocí fotoelasticimetrie lze rozdělit na dvě části. Jedna z nich je samotná měřicí aparatura polariskopu, sestávající z polarizačních filtrů zasazených v rámu a umístěných mezi osvětlovacím pulsem a snímačem, jak je patrné na obrázku 3-1. Tato část zařízení již existuje a je tedy svým zástavbovým prostorem určující pro druhou část zařízení, kterou je zatěžovací mechanismus. Ten je předmětem tohoto konstrukčního řešení a v oblasti vzorků se svými rozměry musí vejít do rámu polariskopu mezi polarizační filtry. Na obrázku 5-1 je znázorněn model zatěžovacího zařízení umístěného v pracovní poloze v polariskopu s detailem na průzor přes polarizační filtry s upnutými vzorky, kde lze vidět velikost průhledové plochy vzorky.



Obr. 5-1 Zatěžovací zařízení v polariskopu

Zatěžovací mechanismus je zobrazen na obrázku 5-2 a je složen z dostatečně tuhého rámu (A), který obsahuje napojovací prvky na polariskop. K rámu je připevněn elektromotor (B) spojkou propojený s hřídelí obsahující řemenici (C). Pomocí řemene je točivý moment přenášen na hřídel pastorku. Ta je k rámu připevněna pomocí ložiskového domku a nese jak vzorek pastorku, tak řemenici. Vzorek pastorku je v kontaktu se vzorkem kola (D) a točivý moment je tak v převodovém poměru přenášen na hřídel kola. Hřídel kola je uložena taktéž na rámu pomocí ložiskového domku a mimo vzorku kola je na ní umístěn i brzdný kotouč. Kotouč je brzděn brzdnými destičkami, které jsou přitlačovány brzdným mechanismem (E) upnutým opět k rámu.

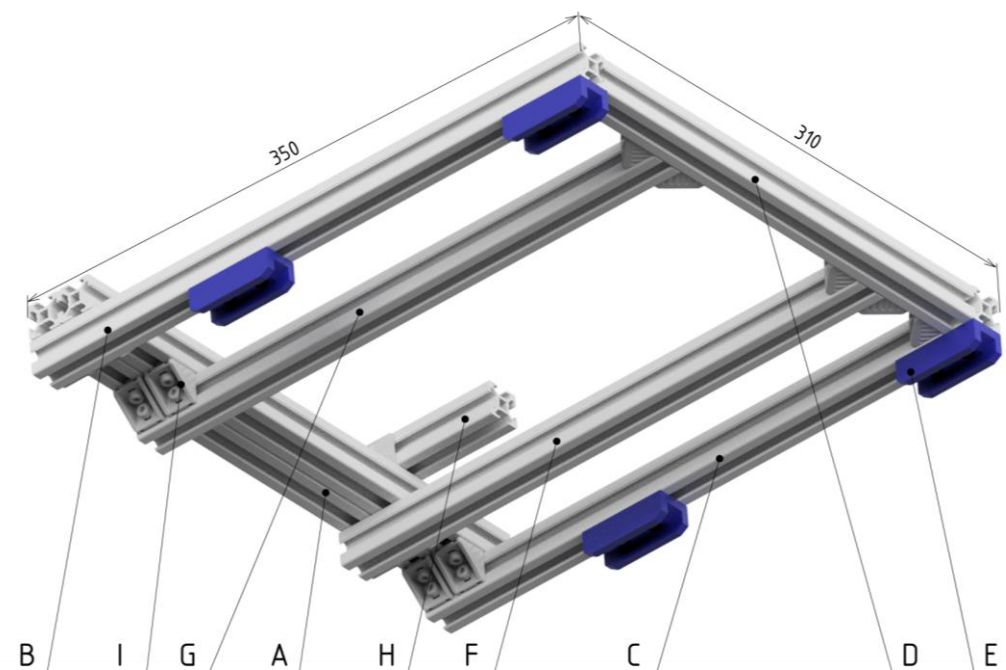


Obr. 5-2 Model zatěžovacího zařízení

5.1 Rám

Konstrukce rámu se skládá z hliníkových profilů od výrobce Rexroth Bosch, případně Alutec KK. Oba výrobci nabízí po funkční stránce obdobné řešení. Z možností zástavbového prostoru byl zvolen nejmenší nabízený profil velikosti 20×20 mm, který nabízí pro dané zatížení konstrukce dostatečnou tuhost. Hliníkové profily obsahují po délce ze všech stran drážku na T-matici, díky které je možné variabilně k profilům připevňovat další zařízení pomocí šroubů a s využitím spojovacích úhelníků (na obrázku 5-3 pozice I) spojovat jednotlivé profily mezi sebou. U profilů vybrané velikosti jsou drážky široké 6 mm a jsou používány šrouby velikosti M4.

Jako základnu celé konstrukce lze označit dvojici profilů (A). K těmto profilům jsou pomocí zmíněných úhelníků připevněny dva rámové profily (B, C), které jsou na druhém konci opět spojeny úhelníky s přídržným profilem (D) a tvoří tak obdélníkový rám konstrukce. Každý rámový profil (B, C) obsahuje dvě plastové drážky (E) určené k vedení zatěžovacího zařízení do tvarových prvků rámu polarizátoru při manipulaci a k ustavení polohy ve dvou směrech při provozu. Plastové drážky jsou vyrobeny metodou 3D tisku a k rámovým profilům jsou každá upevněna dvěma šrouby a T-maticemi.



Obr. 5-3 Model rámu (pohled zdola)

K základním profilům (A) jsou dále pomocí úhelníků upevněny nosné profily (F,G), které se také propojují s přídržným profilem (D). Nosné profily zajišťují polohu ložiskových domků a tím i jednotlivých hřídelí. Poloha nosných profilů vůči obdélníkovému rámu je nastavitelná podle velikosti osové vzdálenosti vzorků. Maximální osová vzdálenost vzorků, které lze na zařízení vyšetřovat je přibližně 130 mm, avšak v tom případě jsou krajní pozice vzorků již mimo polarizační filtry. Pro pozorování celých vzorků je maximální osová vzdálenost přibližně 90 mm v závislosti na velikosti modulu ozubení. Poslední součástí rámu je profil (H) nesoucí elektromotor, který je upevněn k základním profilům pomocí úhelníků. Poloha tohoto profilu je dána polohou nosného profilu vzorku pastorku (F) a to tak, že profil nesoucí elektromotor musí být přímo nad profilem nesoucí vzorek pastorku.

5.2 Vzorky

Pro dimenzování celého zařízení jsou zásadní parametry materiálu a velikost vyšetřovaných vzorků. Volba materiálu také souvisí s postupem výroby vzorku. Pro tvarově obtížné vzorky, kterými jsou i ozubená kola, se jako vhodný výrobní postup jeví tisk pomocí stereolitografie. Pro tisk vzorků je však potřebný vhodný materiál, který bývá obecně drahý a tiskárna, která daný materiál dokáže zpracovat. Na Ústavu konstruování je dostupná stereolitografická tiskárna Form 2 od výrobce Formlabs. Vzorky vytisknuté na této tiskárně podle [33] nevykazují dostatečné vlastnosti pro pozorování fotoelasticimetrickou metodou.

Vzorky lze také vyrobit vyřezáváním laserem nebo vodním paprskem, případně obráběním, u kterého však hrozí vnesení většího zbytkového napětí v oblasti okrajů vzorku. Z tabulky 2-1 vychází pro tyto způsoby výroby nejlépe polykarbonát, který má nejlepší optickou citlivost ze všech vybraných materiálů a zároveň nejvyšší hodnotu dovoleného napětí. Vzorky ozubených kol z tohoto materiálu navíc již byly úspěšně aplikovány, jak plyne z práce [32]. Plné polykarbonátové desky jsou běžně dodávány v tloušťkách 0,75 – 15 mm. Ze zástavbových možností polarizátoru a celkové velikosti zařízení k přihlédnutí k možným výrobním a montážním nepřesnostem byla zvolena tloušťka vzorku $t = 6 \text{ mm}$. Při konstrukci uložení vzorku však bude brán zřetel na variabilitu zařízení a možnost vyšetřování i vzorků jiných tlouštěk.

Velikost vyšetřovaného soukolí vychází z rozměrů polarizátoru. Polarizační filtry mají průměr 200 mm. Vzorky byly vybrány tak, aby byly celé pozorovatelné v tomto prostoru, přestože odlehlé strany jsou pro vyšetřování napěťových stavů nezajímavé. Jako vzorky byly vybrány čelní ozubená kola se standartním evolventním profilem zubů. Při volbě geometrických parametrů soukolí byl největší důraz kladen na maximalizaci modulu ozubení, aby byla nejzajímavější oblast zubů co největší a zároveň aby na pastorku nedošlo k příliš velkému podřezání zubů vlivem nízkého počtu zubů. Důležité parametry ozubeného soukolí jsou shrnuty v tabulce 5-1, použité vztahy z [34].

Tab. 2 Parametry ozubeného soukolí

Název	Označení	Výpočtový vztah	Hodnota
Úhel záběru	α	-	20°
Modul ozubení	m_{12}	-	5 mm
Počet zubů pastorku	z_1	-	15
Počet zubů kola	z_2	-	21
Převodové číslo	u_{12}	$u_{12} = \frac{z_2}{z_1}$	1,4
Převodový poměr	i_{12}	$i_{12} = u_{12}$	1,4
Průměr roztečné kružnice pastorku	d_1	$d_1 = m_{12} \cdot z_1$	75 mm
Průměr roztečné kružnice kola	d_2	$d_2 = m_{12} \cdot z_2$	105 mm
Jednotkové posunutí	$x_1 = x_2$	-	0 mm
Osová vzdálenost	a_{12}	$a_{12} = \frac{d_1 + d_2}{2}$	90 mm
Rozteč	p	$p = \pi \cdot m_{12}$	15,708 mm

Požadované napětí

Pro pozorování jevu fotoelasticimetrie je nutné vyvolat ve vzorku hodnotu napětí, které způsobí dočasný dvojlom a na vzorku v polariskopu se objeví izochromatické čáry. Počet izochromatických čar je závislý na velikosti napětí, optické citlivosti materiálu vzorku a tloušťce vzorku. Pro měření je nutné, aby se na vzorku objevil optimální počet čar, tedy dostatek pro určení rozložení napětí a zároveň takové množství, aby byly čáry od sebe rozlišitelné. Jako optimální počet izochromatických čar bylo zvoleno $\delta = 18$. Redukované napětí σ_{red} odpovídající tomuto řádu je vyjádřeno z hlavní rovnice fotoelasticimetrie (1) uvedené v kapitole 2.1.1. Pro vzorek tloušťky $t = 6$ mm a materiál polykarbonát s optickou citlivostí $k = 7 \text{ N mm}^{-1}$ nabývá hodnoty:

$$\sigma_{red} = \delta \cdot \frac{k}{t} = 18 \cdot \frac{7 \text{ N mm}^{-1}}{6 \text{ mm}} = 21 \text{ MPa} \quad (2)$$

Součinitel bezpečnosti k_k vůči dovolenému napětí polykarbonátu $\sigma_D = 63 \text{ MPa}$ je:

$$k_k = \frac{\sigma_D}{\sigma_{red}} = \frac{63 \text{ MPa}}{21 \text{ MPa}} = 3 \quad (3)$$

Takže požadovaná hodnota napětí je dostatečně bezpečná.

Aby bylo dosaženo spočítaného napětí ve vzorku, je nutné vzorek zatížit vnější silou. Hodnotu tohoto zatížení lze určit pevnostním výpočtem ozubeného kola. Pevnostní výpočet ozubených kol lze provádět podle některé z norem ISO, DIN, AGMA, ČSN [22]. Provádí se kontrola únosnosti boků zubů v dotyku a kontrola únosnosti zubů v ohybu. Výpočet únosnosti v dotyku vychází z Hertzovy teorie styku dvou válců a podle norem je následně takto získaná hodnota korigována pomocí součinitelů.

Pevnostní výpočet v dotyku

Správné určení součinitelů a ověření únosnosti je pro bezpečnou aplikaci ozubeného kola zásadní. V aplikaci ozubeného kola jako vzorku z polykarbonátu, které bude zatěžováno krátkodobě a pouze na hodnotu napětí, které je k dovolenému napětí vzdálené, však bude k pevnostnímu výpočtu přistoupeno zjednodušeně. Pro výpočet napětí v dotyku σ_H je použito modelové situace kontaktu dvou nepohyblivých válců, kterou lze podle [22] řešit pomocí Hertzova kontaktního napětí:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot b} \cdot \frac{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}}{\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}}} \quad (4)$$

Kde: F	síla působící v kontaktu boků zubů
b	pracovní šířka ozubení
ρ_1, ρ_2	poloměry křivosti evolvent v místě dotyku
μ_1, μ_2	Poissonova čísla materiálu pastorku a kola
E_1, E_2	moduly pružnosti materiálu pastorku a kola

Poloměr křivosti evolvent lze nahradit poloměry křivosti oskulačních kružnic, pro něž u nekorigovaného soukolí platí:

$$\rho_1 = \frac{d_1 \cdot \sin \alpha}{2} = \frac{75 \text{ mm} \cdot \sin(20^\circ)}{2} = 12,8 \text{ mm} \quad (5)$$

$$\rho_2 = \frac{d_2 \cdot \sin \alpha}{2} = \frac{105 \text{ mm} \cdot \sin(20^\circ)}{2} = 18,0 \text{ mm} \quad (6)$$

Z rovnice (4) lze vyjádřit sílu F při uvažování, že napětí v dotyku nabývá právě hodnoty požadovaného redukovaného napětí pro vyvolání izochromatické čáry 18. řádu, tedy $\sigma_H = \sigma_{red} = 21 \text{ MPa}$. Pracovní šířka ozubení $b = t = 6 \text{ mm}$ a jelikož materiál pastorku i kola je shodný, tak $\mu_1 = \mu_2 = \mu = 0,28$ a $E_1 = E_2 = E = 2,3 \text{ GPa}$ a vztah se dá zjednodušit na:

$$F = \frac{\sigma_H^2 \cdot \pi \cdot b \cdot 2 \cdot \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right)}{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}} = \frac{(21 \text{ MPa})^2 \cdot \pi \cdot 6 \text{ mm} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1 - 0,28^2}{2,3 \cdot 10^3 \text{ MPa}} \right)}{\frac{1}{12,8 \text{ mm}} + \frac{1}{18,0 \text{ mm}}} = 49,8 \text{ N} \quad (7)$$

Napětí v dotyku při zatížení silou $F = 49,8 \text{ N}$ bude dosahovat hodnoty $\sigma_H = 21 \text{ MPa}$ a bezpečnost vůči dovolenému napětí je shodná s bezpečností vypočtenou rovnicí (3). Na vzorku v místě dotyku lze očekávat nejvyšší řád izochromatické čáry $\delta = 18$.

Pevnostní výpočet v ohybu

Napětí v ohybu σ_F je nejkritičtější v patě zubu. K jeho určení je opět přistoupeno zjednodušeným výpočtem bez užití korekčních součinitelů a to pomocí Lewisovy rovnice [35], která vychází z představy zubu jakožto vetknutého prutu zatíženého statickou osamělou silou kolmou k střednici prutu. Po úpravě [22] lze tento postup zapsat jako:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b \cdot m_{12} \cdot Y} \quad (8)$$

Kde: F_t síla v tečném směru
 Y Lewisův součinitel tvaru zubu

Tečnou sílu lze z geometrie zatížení určit jako:

$$F_t = F \cdot \cos \alpha = 49,8 \text{ N} \cdot \cos 20^\circ = 46,8 \text{ N} \quad (9)$$

Lewisův součinitel je určen podle počtu zubů pastorku a kola z [22] jako $Y_1 = 0,290$ a $Y_2 = 0,328$. Napětí v ohybu pro pastorek σ_{F1} a pro kolo σ_{F2} lze poté určit dosazením do rovnice (8) jako:

$$\sigma_{F1} = \frac{F_t}{b \cdot m_{12} \cdot Y_1} = \frac{46,8 \text{ N}}{6 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm} \cdot 0,290} = 5,4 \text{ MPa} \quad (10)$$

$$\sigma_{F2} = \frac{F_t}{b \cdot m_{12} \cdot Y_2} = \frac{46,8 \text{ N}}{6 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm} \cdot 0,328} = 4,8 \text{ MPa} \quad (11)$$

Napětí v ohybu se obvykle kontroluje vůči únavovému porušení. Vzhledem k již zmíněným provozním časům a podmínkám provozu vzorků, nízkému zatížení a obtížnému určení materiálových parametrů polykarbonátového materiálu, je tato kontrola vynechána a je provedena pouze kontrola vůči dovolenému zatížení. Vzhledem k tomu, že v patě zubu je koncentrátor napětí, je vypočtené napětí korigováno součinitelem tvaru s uvažováním $D/d = \infty$ (aproximováno na $D/d = 3$) a $r/d = 0,38 \cdot m_{12}/s_{Fn} = 0,38 \cdot 5 \text{ mm}/10 \text{ mm}$, kde s_{Fn} je tloušťka nebezpečného průřezu paty zubu konzervativně určena pro pastorek z $s_{Fn} = \sqrt{13,5 \cdot Y_1 \cdot m_{12}^2} = \sqrt{13,5 \cdot 0,290 \cdot (5 \text{ mm})^2} = 10 \text{ mm}$. Těmto parametrům podle [22; 36] odpovídá součinitel tvaru $\alpha_Z = 1,49$. Extrémní hodnota napětí se určí jako:

$$\sigma_{F1ex} = \alpha_Z \cdot \sigma_{F1} = 1,49 \cdot 5,4 \text{ MPa} = 8,0 \text{ MPa} \quad (12)$$

$$\sigma_{F2ex} = \alpha_Z \cdot \sigma_{F2} = 1,49 \cdot 4,8 \text{ MPa} = 7,2 \text{ MPa} \quad (13)$$

Bezpečnost vůči dovolenému napětí pro pastorek k_{kF1} a kolo k_{kF2} je:

$$k_{kF1} = \frac{\sigma_D}{\sigma_{F1ex}} = \frac{63 \text{ MPa}}{8,0 \text{ MPa}} = 7,9 \quad (14)$$

$$k_{kF2} = \frac{\sigma_D}{\sigma_{F2ex}} = \frac{63 \text{ MPa}}{7,2 \text{ MPa}} = 8,8 \quad (15)$$

Kolo i pastorek tedy vyhovují a lze na nich v provozu v místě paty zubu očekávat nejvyšší řád izochromatické čáry určený z rovnice (1):

$$\delta_{F1} = \frac{\sigma_{F1ex} \cdot t}{k} = \frac{8,0 \text{ MPa} \cdot 6 \text{ mm}}{7 \text{ N mm}^{-1}} = 7 \quad (16)$$

$$\delta_{F2} = \frac{\sigma_{F2ex} \cdot t}{k} = \frac{7,2 \text{ MPa} \cdot 6 \text{ mm}}{7 \text{ N mm}^{-1}} = 6 \quad (17)$$

Tedy 7 izochromatických čar na pastorku a 6 na kole. Takový počet izochromatických čar je v oblasti paty zubu dostatečný.

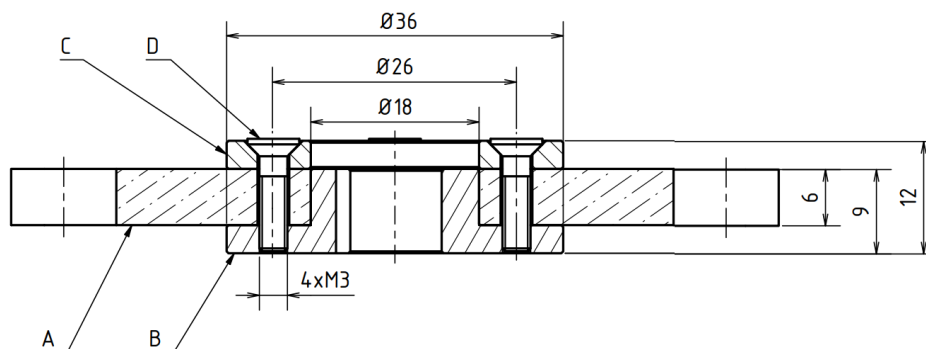
Z požadovaného zatížení je určen požadovaný točivý moment na pastorku M_{k1} a na kole M_{k2} , které jsou zásadní pro dimenzování pohonného a brzdícího mechanismu.

$$M_{k1} = \frac{d_1}{2} \cdot F_t = \frac{75 \text{ mm}}{2} \cdot 46,8 \text{ N} = 1760 \text{ N mm} \quad (18)$$

$$M_{k2} = \frac{d_2}{2} \cdot F_t = \frac{105 \text{ mm}}{2} \cdot 46,8 \text{ N} = 2460 \text{ N mm} \quad (19)$$

Uložení vzorku

Uložení vzorků pastorku i kola je realizováno stejnými součástmi. Vzorek (A) dosedá na středící přírubu (B) která je uložena na hřídeli a přenos točivého momentu s hřídelí je zajištěn těsným perem. Na středící přírubě je vzorek zajištěn přitlačnou přírubou (C) spojenou se středící přírubou pomocí čtveřice šroubů $M3 \times 12$ s kuželovou zápusťnou hlavou a vnitřním šestihranem (D) (obrázek 5-4). Konstrukce umožňuje v případě potřeby uložení i tenčích vzorků, pak je však nutné použít tomu odpovídající kratší šrouby.



Obr. 5-4 Nákres uložení vzorku

5.3 Pohonný mechanismus

Elektromotor

Pohonný mechanismus musí zajistit dostatečný točivý moment, který vyplynul z rovnice (18) a zároveň rozpohybovat vzorky vhodnou rychlostí. Zatěžovací zařízení má sloužit k názorné vizualizaci jevu fotoelasticimetrie a to pro pozorování i pouhým okem. Z tohoto důvodu jsou požadované otáčky vzorků zvoleny velmi nízké. Snížení otáček volbou vhodného poměru průměrů řemenic není možné, jelikož řemenice s větším průměrem by byla umístěna pod vzorkem, což by zmenšovalo průsvitnou plochu vzorku. Proto byl elektromotor vybírán s jasnými požadavky na jeho točivý moment a i na jeho výstupní otáčky.

Velkou variabilitu otáček nabízí krokové motory, avšak cena tohoto typu motoru, který by v nízkých otáčkách zajistil dostatečnou plynulost chodu je velmi vysoká, navíc vyžaduje připojení přes řídicí jednotku. Proto byl vybrán stejnosměrný motor PG420-24-294-B dodávaný s integrovanou planetovou převodovkou, jehož cena je výrazně nižší a nabízí dostatečný točivý moment $M_M = 2453 \text{ N mm}$ a nízké otáčky $n_M = 22 \text{ min}^{-1}$. Ostatní součásti pohonného mechanismu budou dimenzovány právě na hodnotu jmenovitého momentu motoru.

Řemen a řemenice

Točivý moment z motoru je na hřídel pastorku přenášén ozubeným řemenem a řemenicemi. Požadovaná únosnost řemene závisí na přenášéném momentu a na průměru řemenic. Jelikož motor dodává požadované otáčky i moment, převodový poměr řemenic je 1. Maximální průměr řemenic byl omezen na průměr příruby vzorku, aby nedošlo k dalšímu zmenšení průsvitné plochy vzorku. Jako vhodná byla vybrána řemenice 16 AT3/32-2, která má počet zubů $z_R = 32$ s roztečí $p_R = 3$ mm a je určena pro řemen šířky 6 mm, což je nejužší rozměr běžně dodávaných řemenů se zuby AT3. Roztečný průměr zvolené řemenice D_R a síla přenášéná řemenem F_U jsou:

$$D_R = \frac{z_R \cdot p_R}{\pi} = \frac{32 \cdot 3 \text{ mm}}{\pi} = 30,56 \text{ mm} \quad (20)$$

$$F_U = \frac{2 \cdot M_M}{D_R} = \frac{2 \cdot 2453 \text{ N mm}}{30,56 \text{ mm}} = 160,5 \text{ N} \quad (21)$$

Délka řemene vychází ze zástavbových rozměrů korigovaná normalizovanými délkami řemenů a je 450 mm a počet zubů řemene je tak $z_B = 150$. Řemen je pro jeho správnou funkci nutné předeprnout. Sílu předpětí jedné větve řemene F_V je podle výrobce [37] možné určit z přenášéné síly a podle počtu zubů řemene z rovnice (22), která platí pro počet zubů zvoleného řemene. Celková síla působící na řemenici F_R je vyjádřena v rovnici (23) a síla přenášéná napjatou větví F_{R1} je vyjádřena v rovnici (24).

$$F_V = \frac{1}{2} F_U = \frac{1}{2} \cdot 160,5 \text{ N} = 80,3 \text{ N} \quad (22)$$

$$F_R = 2 \cdot F_V + F_U = 2 \cdot 80,3 \text{ N} + 160,5 \text{ N} = 321 \text{ N} \quad (23)$$

$$F_{R1} = F_V + F_U = 80,3 \text{ N} + 160,5 \text{ N} = 240,8 \text{ N} \quad (24)$$

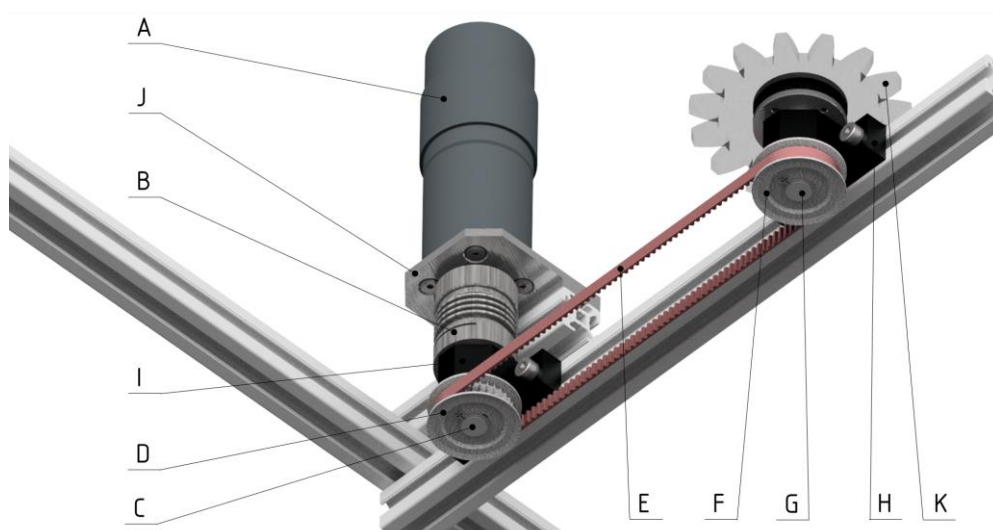
Takové zatížení dokáže z řemenů s AT profilem a šířkou $b_R = 6$ mm přenést řemen CONTI SYNCHROFLEX 6 AT 3/450 GEN III. s únosností tažného vlákna 330 N. Z katalogu výrobce [37] lze také určit specifickou zatížitelnost zubu, která při konzervativním uvažování otáček 40 min^{-1} , je $3,96 \text{ N mm}^{-1}$. Potřebný počet zubů v záběru pak je:

$$z_{RFmin} = \frac{F_U}{F_{Uspec} \cdot b_R} = \frac{160,5 \text{ N}}{3,96 \text{ N mm}^{-1} \cdot 6 \text{ mm}} = 7 \quad (25)$$

Počet opáсанých zubů řemenice je z geometrie uložení 16, takže konfigurace řemene s řemenicemi je pro dané zatížení vyhovující.

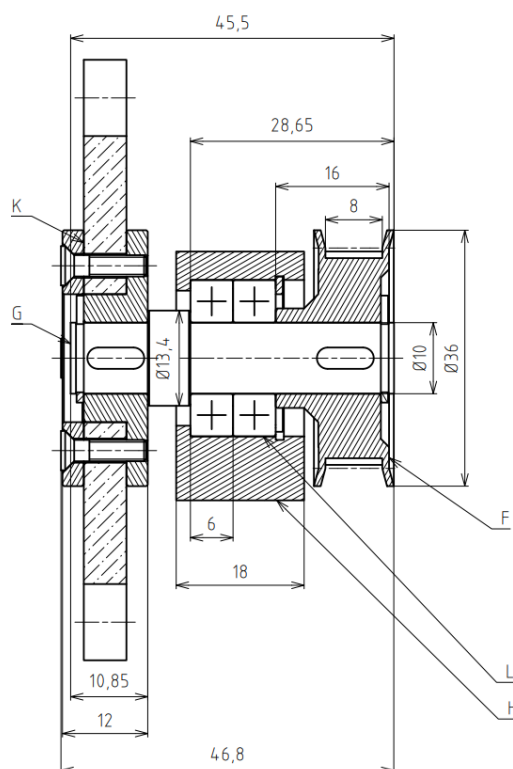
Hřídele

Komplikace nastává u uložení řemenice (C) u elektromotoru (A). Původní záměr byl umístit řemenici přímo na výstupní hřídel elektromotoru, avšak řemen (E) vyvolává vysoké radiální zatížení, které překračuje dovolenou hodnotu radiálního zatížení výstupní hřídele. Proto je nutné řemenici umístit na vlastní hřídel, která je s elektromotorem propojena spojkou (B). Pro toto spojení byla vybrána vlnovcová spojka BKL/4,5/8/10, která umožňuje drobné radiální úhlové i axiální nepřesnosti montáže spojovaných hřídelí a zároveň spolehlivý přenos točivého momentu. Zajištění spojky na výstupní hřídeli elektromotoru je realizováno tlakovým sevřením spojky doplněné o stavěcí šroub, který dosedá na ploché zakončení hřídele. S hřídelí řemenice je spojka spojena tlakovým sevřením spojky.



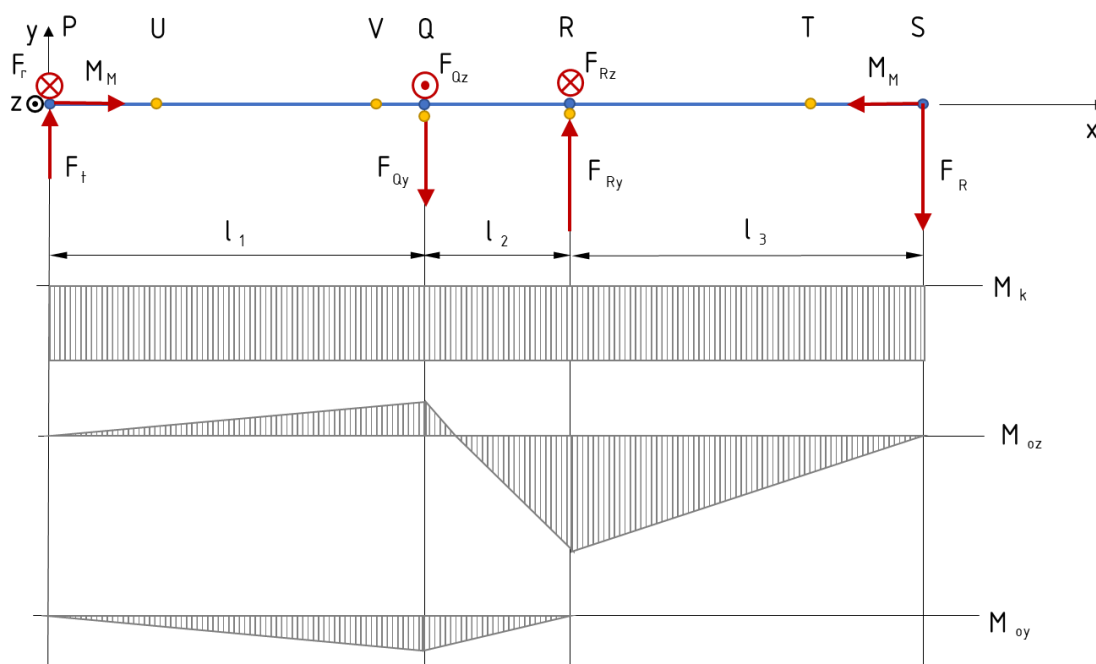
Obr. 5-5 Model pohonného mechanismu

Hřídel řemenice (C) je uložena v ložiskovém domku (I) dodávaném společností MiSUMI s dvojicí ložisek 6900 ZZ (L), která nabízí dostatečnou únosnost, a s vzdáleností osy od montážní plochy 20 mm pod označením BGMWB 6900 ZZ – 20 – KKC. Hřídel pastorku (G) je uložena v ložiskovém domku (H) stejného typu. Napnutí řemene je zajištěno posunem ložiskových domků v drážce nosného profilu. Obě hřídele mají nosný průřez v oblasti řemenic 10 mm a s řemenicí jsou propojeny drážkou pro pero. Axiální posuv je zajištěn pojistnými kroužky. Vzhledem k tomu, že geometrie v oblasti řemenice, materiál i kroutící moment v hřídelích je shodný, je pevnostně ověřována pouze více namáhaná hřídel, což je hřídel pastorku. Ta je osazena řemenicí (F) na jednom konci a vzorkem pastorku (K) na druhém konci (obrázek 5-5 a 5-6). Interakce těchto součástí s okolím tvoří vnější zatížení hřídele. V pevnostním výpočtu je uvažováno zatížení při kritičtější směru otáčení vzorku.



Obr. 5-6 Nákres hřídele pastorku se součástmi

Průběh kroutícího a ohybových momentů je znázorněn na obrázku 5-7. Jsou zde také vyznačená místa P a S, která představují postupně zatížení od vzorku a od řemenice. Body Q a R značí vazby – ložiska. Žlutě vyznačené body jsou nebezpečné průřezy. Místa U a T jsou průřezy s drážkou pro pero, průřez V značí osazení hřídele a průřezy Q a R jsou průřezy s maximálními ohybovými momenty.



Obr. 5-7 Průběh VVÚ na hřídeli pastorku s vyznačenými kritickými průřezy

Pevnostní výpočet byl proveden na průřezu R, jelikož je to průřez s nejvyšším zatížením a na průřezech V a T, jelikož to jsou průřezy s rozdílnými koncentratory napětí. Průřezy U a Q nebyly kontrolovány, neboť jsou to průřezy se stejnou geometrií jako některé z kontrolovaných průřezů a zatížení v těchto bodech je nižší. Jako ilustrační je v této práci uveden pevnostní výpočet v nejkritičtějším průřezu, kterým je průřez T. Zatížení je v tomto průřezu od kroutícího momentu $M_{kT} = M_M = 2453 \text{ N mm}$ a ohybového momentu $M_{ozT} = F_R \cdot |ST| = 321 \text{ N} \cdot 4,5 \text{ mm} = 1445 \text{ N mm}$. Průměr hřídele $d = 10 \text{ mm}$ je v tomto místě oslaben drážkou pro pero $d_s = d - t_1 = 10 \text{ mm} - 1,7 \text{ mm} = 8,3 \text{ mm}$. Součinitele tvaru pro drážku pro pero lze podle [22] uvažovat jako $\alpha_{\sigma T} = 1,8$ a $\alpha_{\tau T} = 3,2$. Nominální a extrémní hodnoty napětí jsou:

$$\sigma_{nomT} = \frac{32 \cdot M_{ozT}}{\pi \cdot d_s^3} = \frac{32 \cdot 1445 \text{ N mm}}{\pi \cdot (8,3 \text{ mm})^3} = 25,7 \text{ MPa} \quad (26)$$

$$\tau_{nomT} = \frac{16 \cdot M_{kT}}{\pi \cdot d_s^3} = \frac{16 \cdot 2453 \text{ N mm}}{\pi \cdot (8,3 \text{ mm})^3} = 21,8 \text{ MPa} \quad (27)$$

$$\sigma_{exT} = \alpha_{\sigma T} \cdot \sigma_{nomT} = 1,8 \cdot 25,7 \text{ MPa} = 46,3 \text{ MPa} \quad (28)$$

$$\tau_{exT} = \alpha_{\tau T} \cdot \tau_{nomT} = 3,2 \cdot 21,8 \text{ MPa} = 69,8 \text{ MPa} \quad (29)$$

Jako materiál hřídelí byla vybrána hliníková slitina EN AW 2011, která nabízí velmi dobrou obrobitelnost a zároveň dostačující mechanické vlastnosti s mezí pevnosti $R_{mAl} = 320 \text{ MPa}$ a smluvní mezí kluzu $R_{p0,2Al} = 270 \text{ MPa}$. Redukované napětí a bezpečnost k meznímu stavu pružnosti jsou:

$$\begin{aligned} \sigma_{redT} &= \sqrt{\sigma_{exT}^2 + 4 \cdot \tau_{exT}^2} = \sqrt{(46,3 \text{ MPa})^2 + 4 \cdot (69,8 \text{ MPa})^2} = \\ &= 147,1 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (30)$$

$$k_{kT} = \frac{R_{p0,2Al}}{\sigma_{redT}} = \frac{270 \text{ MPa}}{147,1 \text{ MPa}} = 1,8 \quad (31)$$

Jelikož je hřídel zatěžována ohybem za rotace je nutné provést ještě kontrolu k meznímu stavu únavy. V práci je opět provedena kontrola pouze k nejkritičtějšímu průřezu T. Mez únavy pro hliníkové slitiny lze podle [38] určit jako $\sigma_{Co} = 0,45 \cdot R_{mAl} = 0,45 \cdot 320 \text{ MPa} = 144 \text{ MPa}$. Pomocí Marinovy rovnice (32) je určena korigovaná mez únavy. Součinitele určeny podle [22] pro obráběnou součást součinitel jakosti povrchu $k_a = aR_{mAl}^b = 4,51 \cdot 320^{-0,265} = 0,98$, velikosti $2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$ součinitel velikosti tělesa $k_b = 1,24 \cdot d^{-0,107} = 1,24 \cdot 10^{-0,107} = 0,97$ součinitel způsobu zatěžování $k_c = 1$, součinitel teploty $k_d = 1$, součinitel spolehlivosti pro spolehlivost 99 % $k_e = 0,814$.

$$\sigma'_{Co} = k_a k_b k_c k_d k_e \sigma_{Co} = 0,98 \cdot 0,97 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,814 \cdot 144 \text{ MPa} = 111 \text{ MPa} \quad (32)$$

Součinitele vrubu lze určit ze součinitelů tvaru a vrubových citlivostí q a q_τ . Pro vyšetřovaný vrub podle [22] platí $\beta_{\sigma T} = 1 + q \cdot (\alpha_{\sigma T} - 1) = 1 + 0,3 \cdot (1,8 - 1) = 1,24$ a $\beta_{\tau T} = 1 + q \cdot (\alpha_{\tau T} - 1) = 1 + 0,3 \cdot (3,2 - 1) = 1,66$, což ukazuje na nízkou vrubovou citlivost hliníkové slitiny. Ohybové napětí má souměrný střídavý průběh s amplitudou $\sigma_{aT} = \beta_{\sigma T} \cdot \sigma_{nomT} = 1,24 \cdot 25,7 \text{ MPa} = 31,9 \text{ MPa}$ a nulovým středním napětím. Tečné napětí od kroutícího momentu má nulové napětí amplitudy a střední napětí $\tau_{mT} = \beta_{\tau T} \cdot \tau_{nomT} = 1,66 \cdot 21,8 \text{ MPa} = 36,2 \text{ MPa}$. Redukované napětí amplitudy a redukované střední napětí pak jsou:

$$\sigma_{aredT} = \sigma_{aT} = 31,9 \text{ MPa} \quad (33)$$

$$\sigma_{mredT} = \sqrt{4 \cdot \tau_{mT}^2} = \sqrt{4 \cdot (36,2 \text{ MPa})^2} = 72,4 \text{ MPa} \quad (34)$$

K vyhodnocení bezpečnosti je použito nejkonzervativnější Soderbergovo kritérium, z kterého součinitel bezpečnosti lze vyjádřit jako:

$$k_{uT} = \frac{1}{\frac{\sigma_{aredT}}{\sigma'_{Co}} + \frac{\sigma_{mredT}}{R_{p0,2Al}}} = \frac{1}{\frac{31,9 \text{ MPa}}{111 \text{ MPa}} + \frac{72,4 \text{ MPa}}{270 \text{ MPa}}} = 1,8 \quad (35)$$

Bezpečnost vůči oběma posuzovaným mezním stavům je dostatečná a parametry hřídele vyhovují.

Točivý moment je přenášen pomocí těsných per, která jsou kontrolována na otlacení v náboji, jelikož materiál náboje i hřídele má stejnou hodnotu dovoleného stykového tlaku $p_0 = 100 \text{ MPa}$ [22]. Korekce pro jednosměrné klidné zatížení činí $p_D = 0,8 \cdot p_0 = 0,8 \cdot 100 \text{ MPa} = 80 \text{ MPa}$. Tangenciální síla působící na pero je $F_{tp} = 2 \cdot M_M / d = 2 \cdot 2453 \text{ N mm} / 10 \text{ mm} = 491 \text{ N}$. Minimální délka pera pak lze určit ze vztahu (33), kde $t_p = 1,3 \text{ mm}$ je hloubka drážky v náboji a $b_p = 3 \text{ mm}$ je šířka pera.

$$l_{pmin} = \frac{F_{tp}}{t_p \cdot p_D} + b_p = \frac{491 \text{ N}}{1,3 \text{ mm} \cdot 80 \text{ MPa}} + 3 \text{ mm} = 7,7 \text{ mm} \quad (36)$$

Z normalizovaných rozměrů je zvolena délka pera $l_p = 8 \text{ mm}$.

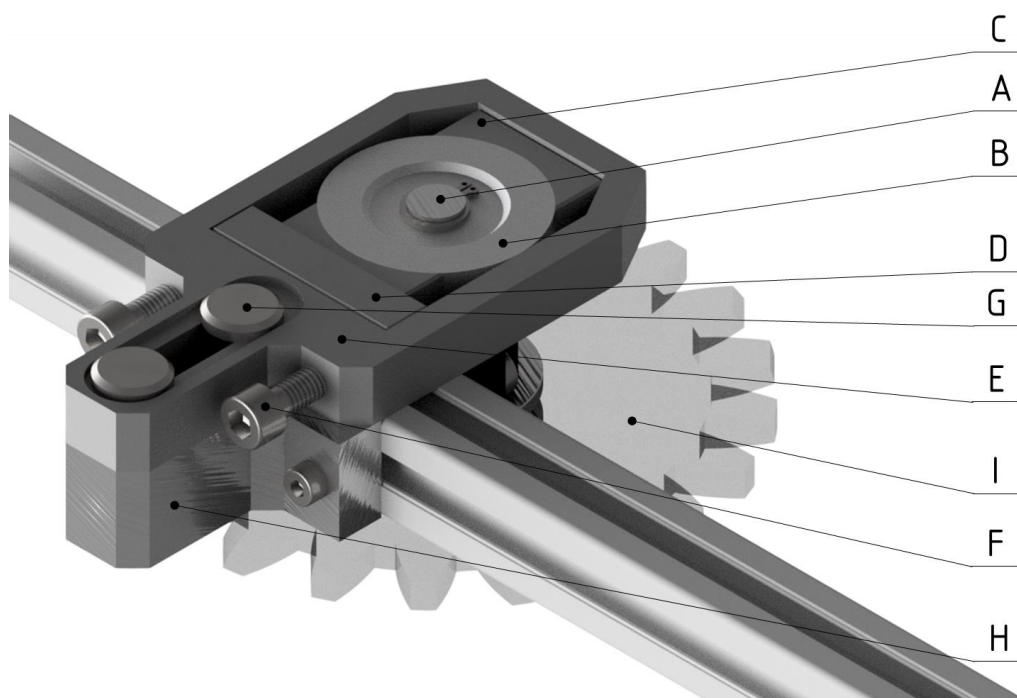
5.4 Brzdící mechanismus

Brzda

Brzdění je realizováno prostým třením dvou povrchů, kdy je mechanická energie přeměňována na teplo. Požadovaný brzdný moment vychází z rovnice (19). Ze zástavbových možností, je průměr brzdného kotouče zvolen $d_B = 40 \text{ mm}$ a jeho tloušťka $t_B = 10 \text{ mm}$. Třecí síla, kterou je nutné vyvinout je:

$$F_{tB} = \frac{2 \cdot M_{k2}}{d_B} = \frac{2 \cdot 2460 \text{ N mm}}{40 \text{ mm}} = 123 \text{ N} \quad (37)$$

Brzdný mechanismus je koncipován jako radiální brzda s plovoucím třmenem (E), kdy k brzdnému kotouči (B) uloženému na hřídeli kola (A) je přitlačována posuvná deska (D) s brzdovou destičkou uloženou na talířových pružinách. Přítlačná síla je vytvářena dvojicí šroubů (F), které lze regulovat i za provozu v polariskopu šestihranným klíčem. Tato síla vyvolává kontaktem s brzdným kotoučem reakci ve formě posuvu brzdového třmenu uloženého posuvně na čepech (G) a tím je přitlačována druhá brzdová destička (C). Čepy držící třmen jsou uloženy do držáku brzdy (H) a zajištěny pojistným kroužkem. Držák brzdy je šrouby připevněn k nosnému profilu (obrázek 5-8). Všechny součásti brzdy kromě držáku brzdy jsou z důvodu vysokého zatížení vyráběny z oceli.



Obr. 5-8 Model brzdy

Obě brzdové destičky jsou v případě opotřebení vyměnitelné. Maximální opotřebení každé z destiček jsou 3 mm, což je i hodnota maximálního posuvu třmenu na čepech. Destička na posuvné desce je zasazena ve vyfrézovaném otvoru rozměrem odpovídajícím rozměrům destičky a talířových pružin uložených pod destičkou. Destička umístěná na třmenu je proti posuvu při brzdění zajištěna šroubovým spojením s třmenem. Po sejmutí brzdového třmenu z brzdného kotouče lze obě brzdové destičky vyjmout.

Součinitel smykového tření za pohybu pro třecí materiály ocel – ocel za sucha je podle [34] 0,1 až 0,2. Vzhledem k úpravě ploch a kombinaci materiálu brzdového kotouče a brzdových destiček je součinitel tření uvažován jako $\mu_t = 0,15$. Přítlačná síla působící na posuvnou desku F_{NB} pak musí být:

$$F_{NB} = \frac{F_{tB}}{2 \cdot \mu_t} = \frac{123 \text{ N}}{2 \cdot 0,15} = 410 \text{ N} \quad (38)$$

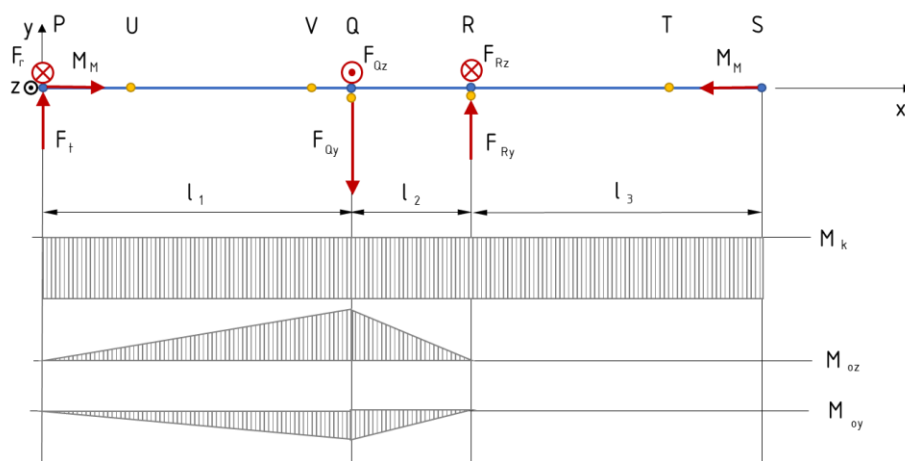
Průmětná kontaktní plocha destičky je $S_B = 300 \text{ mm}^2$. Dovolенý kontaktní tlak podle [22] je 1,7 MPa. Při uvažování konstantního průběhu tlaku po průmětné ploše brzdové destičky dosáhne kontaktní tlak hodnoty:

$$p_B = \frac{F_{NB}}{S_B} = \frac{410 \text{ N}}{300 \text{ mm}} = 1,37 \text{ MPa} \quad (39)$$

Hřídel kola

Hřídel kola má z důvodu snadné zaměnitelnosti stejnou geometrii jako hřídel pastorku a je takéž uložena v ložiskovém domku BGMWB 6900 ZZ – 20 – KKC. Průběh zatížení je oproti hřídeli pastorku odlišný a je zobrazen na obrázku 5-10. Místo řemenice tato hřídel nese brzdový kotouč (S), který odebírá dodávaný krouticí moment ze vzorku (P). Ohybový moment vytváří pouze zatížení od vzorku a toto zatížení je kompenzováno dvojicí ložisek (Q, R) (obrázek 5-9).

Na obrázku 5-9 jsou opět zvýrazněny žlutými body nebezpečné průřezy, které se svou geometrií shodují s popisem obrázku na straně 43. Jako nejvíce kritické lze při tomto uložení uvést body U, V, které obsahují koncentrátoři napětí a bod Q, který je nejvíce zatížený. Pro tyto body byla provedena pevnostní kontrola obdobným způsobem jako je uvedeno na stranách 44 – 46. Jako nejkritičtější vyšel průřez U v místě drážky pro pero se součinitelem bezpečnosti k meznímu stavu pružnosti $k_{kU} = 1,9$ a k meznímu stavu únavy $k_{uU} = 3,1$. Parametry hřídele tedy vyhovují.



Obr. 5-9 Průběh VVÚ na hřídeli kola s vyznačenými kritickými průřezy

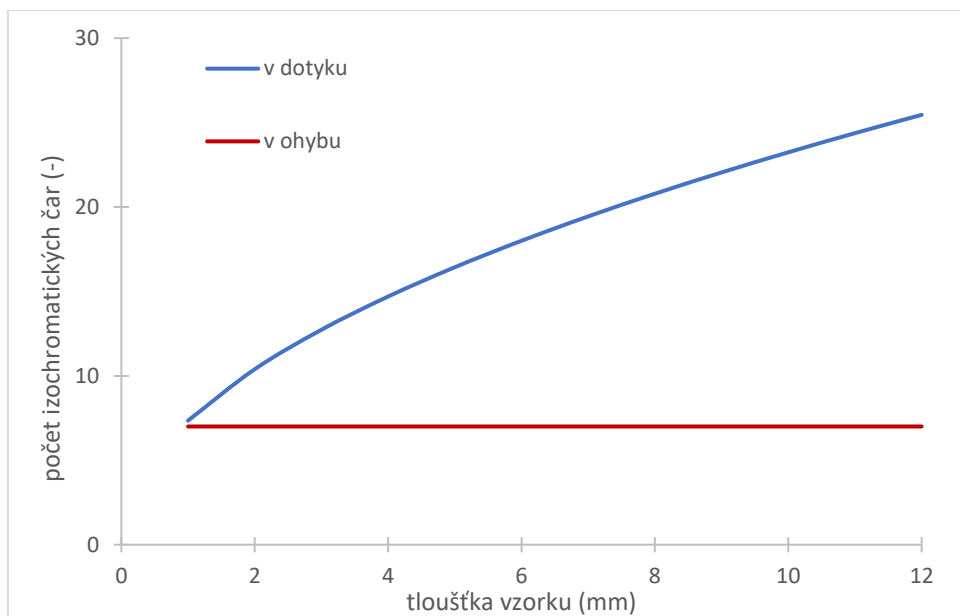
6 DISKUZE

Výsledkem bakalářské práce je konstrukční návrh zatěžovacího zařízení, které umožní pozorování pohyblivých vzorků metodou fotoelasticimetrie. Funkčnost tohoto zařízení prozatím nebyla prakticky ověřena, avšak provedené výpočty a dimenzování celého zařízení prokazovaly, že vyvolané napětí ve vzorcích by mělo být dostatečné. Výpočty vzorku ozubeného soukolí však byly provedeny zjednodušeným postupem, který zanedbává řadu materiálových i provozních vlivů. To může vést k potřebě jiné velikosti zatížení, než jaké bylo očekáváno.

V zásadě tak během experimentu může nastat několik stavů. První z nich je, že zatížení, které je zařízení schopné vyvinout vyvolá vyšší napjatost ve vzorcích, než která byla očekávána a na vzorcích se tak objeví příliš mnoho izochromatických čar. Tento problém lze snadno odstranit regulací brzdné síly na brzdových destičkách. Opačným problémem, který může nastat, je, že zatížení vyvolané zařízením způsobí ve vzorku nízké hodnoty napětí, které neumožní pozorování fotoelasticimetrických jevů. Tento problém lze řešit několika způsoby, které se opírají o úpravu vzorků.

Vhodnou úpravou je snížení počtu zubů ozubeného kola. Tím se změní převodový poměr, což způsobí, že stejný brzdný moment bude vyvolávat vyšší zatížení na zuby soukolí. Tato úprava je omezena hodnotou dodávaného momentu elektromotorem. Další možností je snížení modulu ozubení, což by se výrazně projevilo na napětí v ohybu. Poslední možností úpravy vzorků je zmenšení průměru roztečných kružnic. Tato úprava by však sebou nesla i změnu modulu, jelikož jinak by na vzorku pastorku docházelo k výraznému podřezání zubů.

Vhodnou úpravou není zmenšení tloušťky vzorku, která sice zvýší napětí v ohybu i dotyku, ale zároveň stejným poměrem vůči změně napětí v ohybu zvýší i potřebné napětí pro vznik izochromatických čar. Změnou tloušťky vzorku tudíž lze ovlivňovat počet izochromatických čar v dotyku. Tato závislost je zobrazena na obrázku 6-1. Při zachování geometrie ozubených kol i velikosti zatížení lze pozorovat, že se zvyšující se tloušťkou vzorku roste počet zobrazených izochromatických čar, avšak hodnota napětí ve vzorku klesá. Počet izochromatických čar v ohybu se změnou tloušťky nemění, přestože napětí v ohybu na tloušťce vzorku je nepřímo úměrně závislé. Tloušťka vzorku je totiž také nepřímo úměrně závislá na napětí potřebném ke vzniku izochromatické čáry, což vychází z rovnice (1).



Obr. 6-1 Graf závislosti počtu izochromatických čar na tloušťce vzorku

Dimenzování jednotlivých částí zařízení proběhlo s ohledem na potřebné zatížení v místě kontaktu vzorků. Točivý moment, který je schopný dodat elektromotor, je s uvažáním převodového poměru na vzorcích vyšší než brzdný moment, na který je dimenzována brzda. To má své opodstatnění, jelikož přenos energie mezi jednotlivými členy zařízení je ztrátový, tudíž část točivého momentu od elektromotoru bude zmařena již v této fázi. Pokud by mělo být přistoupeno k maximalizaci využití točivého momentu elektromotoru, pak by bylo možné změnit převodový poměr vzorků na hodnotu bližší 1. Tím by stejně velký brzdný moment tvořil vyšší tečnou sílu na zubech vzorků a k jejímu překonání by tak bylo potřebné i vyššího točivého momentu od elektromotoru.

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout konstrukci zatěžovacího mechanismu pro experimentální vyšetřování pohyblivého transparentního vzorku pomocí metody fotoelasticimetrie. Mechanismus měl umožnit pozorování změny napětí uvnitř vzorku v průběhu jeho pohybu a usnadnit tak porozumění napěťových stavů a jejich časového průběhu na vybraném vzorku.

Podle nejčastějších poruch, jejich příčin a průběhů napětí na pohyblivých strojních součástech bylo vybráno pro experimentální vyšetřování ozubené soukolí. Teoretická část se dále zabývala samotnou metodou fotoelasticimetrie, materiály vzorků a způsoby jejich výroby. Z těchto vstupních poznatků bylo určeno zatížení vzorků potřebné pro vizualizaci napjatosti, což je zároveň zatížení, na které je nutné dimenzovat celé zařízení.

Byly navrženy koncepční varianty pohonného a brzdícího mechanismu, z nichž nejlepší byly podkladem pro konstrukční návrh. Ten je kompatibilní se stávajícím polariskopem, bez jakýchkoliv úprav polariskopu, a umožňuje pozorování jak bodu styku vzorků ozubeného soukolí, tak prostor v jeho okolí. Rám konstrukce je sestaven ze součástí umožňujících v případě potřeby jejich uplatnění i u jiného zařízení. U dalších součástí byla dána přednost jejich nákupu před výrobou. Pro vyráběné nebo upravované součásti byla vytvořena výkresová dokumentace, která je přiložena v rámci příloh práce. Příloha dále obsahuje výkres sestavy celého zařízení a digitální model zařízení. Všechny vytyčené cíle tedy byly splněny.

Nad rámec vytyčených cílů je uzpůsobení konstrukce tak, aby bylo možné pozorovat i jiné vzorky ozubených soukolí, než které byly navrženy v této práci, a to nejen změněné velikostně a převodově, nýbrž i s jiným profilem zubů. Toho lze využít například při validaci výsledků získaných metodou konečných prvků, případně při pozorování vývoje trhliny v patě zubu při cyklickém zatížení. Pro tyto aplikace by bylo vhodné opatřit zatěžovací mechanismus o zařízení měřící hodnotu zatížení vzorku. Pro větší variabilitu otáček by bylo možné nahradit stejnosměrný motor motorem krokovým, který umožňuje snadnější regulaci přes řídicí jednotku. Pro dlouhodobé experimenty by bylo nutné upravit konstrukci brzdy, aby nedocházelo k jejímu přehřívání. Teplotní změna v této práci nebyla brána v úvahu právě z důvodu předpokladu krátkodobých testů.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MILBAUER, Miloš. *Fotoelasticimetrie a její použití v praxi*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953.
- [2] BARTUŠKA, Miloslav. *Technická mineralogie*. První. Praha: VŠCHT, 1987.
- [3] THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA. Erasmus Bartholin. *Britannica* [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Erasmus-Bartholin>
- [4] WILSON, C A Carus. The Influence of Surface-Loading on the Flexure of Beams. *Proceedings of the Physical Society of London*. London, 1890, **11**(1), 194-220. ISSN 1478-7814. Dostupné z: doi:10.1088/1478-7814/11/1/327
- [5] BITTNER, Jiří. *Srovnávací analýza napětí součástí s vruby pomocí fotoelasticimetrie a MKP*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Michal Vaverka, Ph.D.
- [6] Photoelasticity: Applications. *Tiedemann Instruments: Mechanical and Optical Measurement Technology* [online]. Garmisch-Partenkirchen (Germany) [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://tiedemann-instruments.de/en/photoelasticity/applications/>
- [7] Products. *Ilis* [online]. Erlangen (Germany), 1998-2021 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.ilis.de/en/products.html>
- [8] Unidad 3 – Ondas Electromagnéticas y Fotones. In: *FÍSICA: Materiales para el curso de física de primero de bachillerato* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://2013fisica.wordpress.com/2014/11/05/unidad-3-ondas-electromagneticas-y-fotones/>
- [9] MILBAUER, Miloš a Miroslav PERLA. *Fotoelasticimetrie a příklady jejího použití*. 1. vyd. Praha: Československá akademie věd, 1961.
- [10] DOYLE, Keith B., Paul K. MANHART, Jose M. SASIAN, Jeffrey M. HOFFMAN, Victor L. GENBERG a Gregory J. MICHELS. *Stress birefringence modeling for lens design and photonics* [online]. In: . s. 436- [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: doi:10.1117/12.486447

- [11] PILKEY, Walter D. *Peterson's Stress Concentration Factors*. Second edition. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1997. ISBN 0-471-53849-3.
- [12] WEI-CHIH, Wang. Photoelasticity. *Engineering Optics: Toy with Light* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://depts.washington.edu/mictech/optics/me557/photoelasticity.pdf>
- [13] PC 1000: POLYKARBONÁT (PC). In: *EPP plasty* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: https://www.eppplasty.cz/pdf/PC_1000.pdf
- [14] HORÁČEK, Lukáš. *Využití nekonvenčních paprskových technologií (LASER/vodní paprsek) ve strojírenství*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
- [15] GANEV, Nikolaj, Ivo KRAUS, Lothar PFEIFFER a H.-D. TIETZ. RENTGENOGRAFICKÝ VÝZKUM ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ VYVOLANÝCH NEKONVENČNIMI TECHNOLOGIEMI ŘEZÁNÍ. In: *Experimentální mechanika* [online]. [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <http://experimentalni-mechanika.cz/cs/konference/konference/1996.html>
- [16] Řezání plexiskla laserem. In: *SET SERVIS: Centrum reklamy a tisku s.r.o.* [online]. Žamberk, 2021 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <http://setservis.cz/technicka-vyroba/plexisklo-a-jeho-zpracovani/>
- [17] KARALEKAS, D.E. a A. AGELOPOULOS. On the use of stereolithography built photoelastic models for stress analysis investigations. *Materials & Design* [online]. 2006, **27**(2), 100-106 [cit. 2021-03-23]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2004.09.028
- [18] CURTIS, J. D., S. D. HANNA, E. A. PATTERSON a M. TARONI. On the use of stereolithography for the manufacture of photoelastic models. *Experimental Mechanics* [online]. 2003, **43**(2), 148-162 [cit. 2021-04-27]. ISSN 0014-4851. Dostupné z: doi:10.1007/BF02410496
- [19] Choosing the right material. *Formlabs* [online]. 2021 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: https://support.formlabs.com/s/article/Choosing-the-Right-Material?language=en_US

- [20] FORTE, Paola, Alessandro PAOLI a Armando Viviano RAZIONALE. A CAE approach for the stress analysis of gear models by 3D digital photoelasticity. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* [online]. 2015, **9**(1), 31-43 [cit. 2021-04-17]. ISSN 1955-2513. Dostupné z: doi:10.1007/s12008-013-0201-4
- [21] VACULKA, Miroslav. *Návrh metodiky výpočtu životnosti valivého ložiska*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. RNDr. Ing. Jan Vrbka, DrSc., dr. h. c.
- [22] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard Gordon BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [23] PRÁŠILOVÁ, Alena. *Výzkum a vývoj ložisek pro trakční motory*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Vrbka Ph.D.
- [24] VIEIRA, Filipe Gomes, Alexandre S. SCARI, Pedro Américo Almeida MAGALHÃES JÚNIOR, Jordana S. R. MARTINS a Cristina Almeida MAGALHÃES. Analysis of Stresses in a Tapered Roller Bearing Using Three-Dimensional Photoelasticity and Stereolithography. *Materials* [online]. 2019, **12**(20) [cit. 2021-04-27]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12203427
- [25] URBAN, Filip. *Kontakt vačky a zdvihátka*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Šperka Ph.D.
- [26] TOMEČEK, Vojtěch. *Realizace edukační úlohy na experimentální stanici s vačkovým mechanismem*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Michal Vaverka, Ph.D.
- [27] NORTON, Robert L. *Cam design and manufacturing handbook*. New York: Industrial Press, 2002. ISBN 0-8311-3122-5.
- [28] OUYANG, Tiancheng, Pan WANG, Haozhong HUANG, Ning ZHANG a Nan CHEN. Mathematical modeling and optimization of cam mechanism in delivery system of an offset press. *Mechanism and Machine Theory* [online]. 2017, **110**, 100-114 [cit. 2021-04-29]. ISSN 0094114X. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmachtheory.2017.01.004

- [29] MORAVEC, Vladimír. *Konstrukce strojů a zařízení II.: čelní ozubená kola : teorie, výpočet, konstrukce, výroba, kontrola*. Ostrava: Montanex, 2001. ISBN 80-7225-051-5.
- [30] ŠEVČÍK, Martin. *Výpočtové modelování deformačně-napěťových stavů čelního soukolí pomocí MKP*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Vrbka Ph.D.
- [31] JORDÁN, Jakub. *Čelní ozubená kola z plastů*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jiří Venclík, Dr.
- [32] RAGHUWANSHI, Naresh K. a Anand PAREY. Mesh stiffness measurement of cracked spur gear by photoelasticity technique. *Measurement* [online]. 2015, **73**, 439-452 [cit. 2021-04-29]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2015.05.035
- [33] BARÉS, Jonathan. 3D printing: Stereolithography. *GitLab* [online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://git-xen.lmgc.univ-montp2.fr/PhotoElasticity/Main/-/wikis/3D-printing>
- [34] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [35] LEWIS, Wilfred. Investigation of the Strength of Gear Teeth. *Proceedings of Engineers Club of Philadelphia*. 1983, **10**.
- [36] PETERSON, R. E. *Koefficienty koncentracii naprjaženij: grafiki i formuly dlja rasčeta konstruktivnykh elementov na pročnosť*. 1. izdaniye. Moskva: Mir, 1977.
- [37] *Continental* [online]. ContiTech AG, 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.continental-industry.com/en/solutions/power-transmission/industrial-applications/drive-belts/synchronous-belts/products/product-range/conti-synchroflex>
- [38] HRUBÝ, Zbyněk. *Dynamická pevnost a životnost* [online]. , 12-36 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/DPZ_2015_Hru01.pdf

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

σ_1, σ_2	hlavní napětí
$\vec{E}, \vec{B}, \vec{c}$	vektory charakterizující světlo
$\vec{E}_Z, \vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_{1A}, \vec{E}_{2A}, \vec{E}_a$	vektory elektrické intenzity světla
δ	řád izochromatické čáry
k	optická citlivost
t	tloušťka vzorku
E	modul pružnosti v tahu
μ	Poissonovo číslo
σ_D	maximální doporučená hodnota napětí
α	úhel záběru
m_{12}	modul ozubení
u_{12}, i_{12}	převodové charakteristiky soukolí
σ_{red}	redukované napětí
k_k, k_u	součinitele bezpečnosti
σ_H, σ_F	napětí – v dotyku, v ohybu
σ_{nom}	nominální napětí
F	síla
$R_e, R_m, R_{p0,2}$	materiálové charakteristiky
F_t	tečná složka síly
M_o, M_k	momenty – ohybové, kroutící
M_{oy}, M_{oz}	momenty – k osám

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Vizualizovaný dočasný dvojlohm pomocí polariskopu (převzato z [6])	14
Obr. 2-2	Schéma polariskopu (převzato z [5])	15
Obr. 2-3	Elektromagnetická vlna (převzato z [8])	15
Obr. 2-4	Schéma průchodu elektromagnetického záření polariskopem se vzorkem (převzato z [5])	16
Obr. 2-5	Pozorování vzorku v (a) přímkově polarizovaném světle, (b) kruhově polarizovaném světle (převzato z [1])	17
Obr. 2-6	Schéma měření v kruhově polarizovaném světle (převzato z [5])	18
Obr. 2-7	Vzorek z plexiskla vyříznutý laserem (převzato z [16])	20
Obr. 2-8	Vzorky vyrobené stereolitograficky z epoxidové pryskyřice (převzato z [20])	21
Obr. 2-9	Pitting na vnitřním kroužku valivého ložiska (převzato z [21])	22
Obr. 2-10	Testovací zařízení stacionárního ozubeného soukolí (převzato z [32])	23
Obr. 3-1	Polariskop v laboratořích Ústavu konstruování	25
Obr. 4-1	Schéma rozdělení konstrukčních uzlů	26
Obr. 4-2	Schéma pohonného mechanismu I.	27
Obr. 4-3	Schéma pohonného mechanismu II.	27
Obr. 4-4	Schéma pohonného mechanismu III.	28
Obr. 4-5	Schéma brzdícího mechanismu I.	29
Obr. 4-6	Schéma brzdícího mechanismu II.	30
Obr. 4-7	Schéma brzdícího mechanismu III.	30
Obr. 4-8	Schéma vybraného koncepčního řešení	31
Obr. 5-1	Zatěžovací zařízení v polariskopu	32
Obr. 5-2	Model zatěžovacího zařízení	33
Obr. 5-3	Model rámu (pohled zdola)	34
Obr. 5-4	Nákres uložení vzorku	40
Obr. 5-5	Model pohonného mechanismu	42
Obr. 5-6	Nákres hřídele pastorku se součástmi	43
Obr. 5-7	Průběh VVÚ na hřídeli pastorku s vyznačenými kritickými průřezy	43

Obr. 5-8	Model brzdy	46
Obr. 5-9	Průběh VVÚ na hřídeli kola s vyznačenými kritickými průřezy	48
Obr. 6-1	Graf závislosti počtu izochromatických čar na tloušťce vzorku	50

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Vlastnosti vybraných skupin materiálů.....	19
Tab. 2	Parametry ozubeného soukolí	36

12 SEZNAM PŘÍLOH

Samostatné přílohy:

Příloha 1: 3D model zařízení	BP-MD-M-01
Příloha 2: 3D model drážky	BP-MD-3D-01
Příloha 3: Výkresová dokumentace:	
Výkres sestavy	BP-MD-S-01
Vzorek pastorku	BP-MD-V-01
Vzorek kola	BP-MD-V-02
Hřídel vzorku	BP-MD-V-03
Hřídel řemenice	BP-MD-V-04
Příruba vzorku středící	BP-MD-V-05
Příruba vzorku přítlačná	BP-MD-V-06
Řemenice	BP-MD-V-07
Spojka	BP-MD-V-08
Držák elektromotoru	BP-MD-V-09
Brzdový kotouč	BP-MD-V-10
Brzdová destička	BP-MD-V-11
Brzdový třmen	BP-MD-V-12
Posuvná deska	BP-MD-V-13
Držák brzdy	BP-MD-V-14
Distanční kroužek	BP-MD-V-15
Čep	BP-MD-V-16